

Siiri Kettunen

IEEE 802.11n/ac -standardien suorituskyky

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietoverkot

Insinöörityö

26.4.2017

Tekijä(t) Otsikko	Siiri Kettunen IEEE 802.11n/ac -standardien suorituskyky
Sivumäärä Aika	31 sivua + 5 liitettä 26.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoverkot
Ohjaaja(t)	Toimitusjohtaja Hannu Jaakohuhta Lehtori Jukka Louhelainen
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia 802.11n- ja 802.11ac-standardien suorituskykyä. Tutkimuksen lähtökohtana toimi aikaisempi tietoverkkoprojektipintokokonaisuuden yhteydessä tehty ryhmätyö, jossa mitattiin 802.11n/ac-yhteensopivien tukiasemien suorituskykyä. Molemmissa projekteissa toimeksiantajana oli Datarocks Oy.</p> <p>Insinööriyön teoriaosuudessa käydään läpi langattomien verkkojen tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavia tekijöitä sekä IEEE 802.11 -standardin keskeisimpiä elementtejä. Käytännön osuudessa tehtiin tiedonsiirtonopeusmittauksia kahdelle kontrolleripohjaiselle tukiasemalle ja yhdelle langattomalle reitittimelle. Kaikki testeissä käytetyt 802.11ac-yhteensopivat tukiasemat perustuivat standardin luonnosversioon. Tiedonsiirtonopeutta mitattiin kuljetuskerrokselta lperf-työkalun avulla. Projektissa testattiin myös TCP/UDP-protokollien suorituskykyä ja TCP-ikkunan koon vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen. Lisäksi langattomalla reitittimellä testattiin WPA2-salauksen vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen.</p> <p>802.11ac-luonnosstandardilla suurimmaksi tiedonsiirtonopeudeksi saatiin noin 280 Mb/s ja 802.11n-standardilla noin 220 Mb/s. Tässä tutkielmassa saadut mittaustulokset toimivat suuntaa antavana arviona 802.11n/ac-standardien suorituskyvystä. Lähtökohtana toimineessa tietoverkkoprojektissa kartoitettiin mittaussympäristön häiriötasoa sekä häiriöiden vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen. Näitä mittaustuloksia hyödynnettiin myös tämän insinööriyöprojektin mittaustulosten käsittelyssä.</p> <p>Toisen aallon ac-laitteet ovat tulleet markkinoille vuoden 2016 loppupuolella, eikä ac-luonnosstandardilla tehtyjä mittauksia voi suoraan soveltaa niiden suorituskyvyn arvioimisessa. Mittaustuloksia voi kuitenkin tarvittaessa käyttää vertailukohtana olemassa olevien WLAN-ympäristöjen optimoinnissa tai uudempien standardiversioiden suorituskyvyn mittaamisessa.</p>	
Avainsanat	IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, suorituskykymittaus

Author(s) Title	Siiri Kettunen Throughput of IEEE 802.11n/ac standards
Number of Pages Date	31 pages + 5 appendices 26 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Information Networks
Instructor(s)	Hannu Jaakohuhta, CEO Jukka Louhelainen, Senior Lecturer
<p>The goal of this Bachelor's thesis was to investigate the performance of 802.11n and 802.11ac standards. The starting point for the research project was an earlier student project where throughput testing was performed to two 802.11n/ac compatible access points. Both projects were commissioned by Datarocks Oy.</p> <p>The main factors affecting throughput in wireless networks and central elements of the IEEE 802.11 standard are discussed in the theory section of the study. In addition, throughput tests were done to two controller based access points and one wireless router. All 802.11ac compatible access points were running the draft version of the standard. Throughput was measured from the transport layer with the Iperf utility. In addition, the TCP/UDP performance and the effect of TCP window size to throughput were investigated. The encryption overhead of WPA2 was also measured on the wireless router. The test methodology and results are described in detail after the theory section.</p> <p>The 802.11ac draft standard provided the fastest throughput in these tests, 280 Mb/s. The fastest throughput measurement with 802.11n was 220 Mb/s. The measurements analysed here can provide an estimate on the performance of 802.11n/ac standards. The noise level of the radio environment and the effect of noise on the throughput were investigated in the student project mentioned earlier. These results were utilized when handling the test results collected during the present project.</p> <p>As of the second half of the year 2016, Wave 2 802.11ac devices have entered the market; test results measured with the draft standard can not necessarily be used to estimate their performance. However, the test results can be used either to optimize existing WLAN environments or as a comparison when testing newer versions of the 802.11 standard.</p>	
Keywords	IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, performance test

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Langattomat lähiverkot	1
2.1	Langattomiin lähiverkkoihin liittyvää käsitteistöä	2
2.2	Tulevaisuudennäkymiä	3
3	IEEE 802.11 -standardi	4
3.1	Arkkitehtuuri	4
3.2	Taajuusalueet ja kanavajako	5
3.3	Modulaatiomenetelmät	6
3.4	Moniantennitekniikka	8
3.5	Tietoturva	9
3.6	802.11n ja 802.11ac	10
4	Palvelunlaatu ja suorituskky WLAN-verkoissa	12
4.1	Tiedonsiirtonopeus	12
4.2	Palvelunlaadun vaatimukset	13
5	Tiedonsiirtonopeustestit	14
5.1	Testeissä käytetyt laitteet	14
5.2	Iperf	15
5.3	Testien suunnittelu ja toteutus	16
5.4	Testiverkot	18
6	Mittaustulokset	19
6.1	TCP-ikkunan vaikutus tiedonsiirtonopeuteen	20
6.2	Tukiasemien sekä 802.11n/ac-standardien vertailu	21
6.3	TCP/UDP-protokollien vertailu	24
6.4	D-Linkin langattoman reitittimen dual-band-suorituskky	26
6.5	Salauksen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen	27
7	Mittaustulosten analysointi	29
8	Pohdintaa	30

Liitteet

Liite 1. D-Linkin tukiasemalla DIR-868L tehdyt tiedonsiirtonopeusmittaukset

Liite 2. Ciscon tukiasemalla AIR-CAP3602I tehdyt tiedonsiirtonopeusmittaukset

Liite 3. Ciscon tukiasemalla AIR-CAP3502I tehdyt tiedonsiirtonopeusmittaukset

Liite 4. D-Linkin langattoman reitittimen dual-band-suorituskyky

Liite 5. Salauksen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen

Lyhenteet

A-MPDU	<i>Aggregate MAC Protocol Data Unit.</i> MAC-protokollayksikkö-aggregaatti.
A-MSDU	<i>Aggregate MAC Service Data Unit.</i> MAC-palveluyksikkö-aggregaatti.
DSSS	<i>Direct-sequence (DS) spread-spectrum.</i> Suorasekvensointi.
EMC	<i>Electromagnetic compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
FHSS	<i>Frequency-hopping spread-spectrum.</i> Hajaspektrihiippely.
LAP	<i>Lightweight access point.</i> Kevyt tukiasema.
MIMO	<i>Multiple-input-multiple output.</i> Moniantennitekniikka.
MU-MIMO	<i>Multi-user MIMO.</i> Monen käyttäjän MIMO.
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing.</i> Monikantaaaltomodulointitekniikka.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation.</i> Amplitudi-vaihemodulaatio.
QOS	<i>Quality of Service.</i> Palvelunlaatu.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio.</i> Signaali-kohinasuhde.
VoWLAN	<i>Voice over wireless LAN.</i> Puhe langattoman lähiverkon ylitse.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network.</i> Langaton lähiverkko.

1 Johdanto

Tämä insinöörityö sisältää kirjallisuuskatsauksen WLAN-verkkojen tiedonsiirtonopeuteen vaikuttaviin tekijöihin ja IEEE 802.11 -standardiin sekä käytännön osuuden, jossa tehdään tiedonsiirtonopeustestejä 802.11n/ac-yhteensopiville WLAN-tukiasemille. Lähtökohtana mittauksissa on aikaisempi tietoverkkoprojekti [1], jossa on tutkittu WLAN-tukiasemien tiedonsiirtonopeutta ja kapasiteettia kahdella eri tukiasemalla. Aikaisempia tutkimuksia jatketaan tekemällä tiedonsiirtonopeusmittauksia pidemmällä mittausvälillä ja esittämällä mittauksien tulokset myös graafisesti pelkän keskinopeuden sijaan. Lisäksi vertailuun otetaan mukaan kolmas tukiasema: mittauksissa käytetään kahta kontrolleripohjaista tukiasemaa sekä yhtä kuluttajakäyttöön suunniteltua langatonta reititintä. 802.11n/ac-standardiversioiden suorituskykyä vertaillaan 20 ja 40 MHz:n kaistanleveyksillä ja 802.11ac-yhteensopivia tukiasemia myös 80 MHz:n kaistanleveydellä. Tiedonsiirtonopeutta mitataan WPA2-salauksella ja ilman salausta. Myös TCP-ikkunan koon vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen tutkitaan. Työssä viitataan myös muihin 802.11-standardin tiedonsiirtonopeuteen tai suorituskykyyn keskittyviin tutkimuksiin. Lisäksi esitellään lyhyesti langattomien lähiverkkojen tulevia kehityssuuntauksia.

Insinöörityön käytännön osuus on tehty Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa toimeksiantajana Datarocks Oy. Aikaisemmassa Datarocks Oy:lle toteutetussa projektissa [1] kerättyä tietoa mittausympäristön WLAN-verkkojen käyttöasteesta ja radioympäristön häiriöistä hyödynnettiin myös tässä työssä tehtyjen nopeusmittausten tarkkuuden ja luotettavuuden arvioimisessa. Tässä työssä saadut mittauksien tulokset toimivat suuntaa antavana arviona siitä suorituskyvyn tasosta, mitä 802.11n/ac-standardeilta voidaan odottaa vastaavanlaisissa ympäristöissä.

2 Langattomat lähiverkot

Langattomat lähiverkot eli WLAN-verkot ovat nimensä mukaisesti lyhyen kantaman langattomia verkkoja, joiden tyypillisiä käyttökohteita ovat kotitaloudet, yritysten asiakkaille ja työntekijöille tarjoamat langattomat verkot sekä julkiset hot-spotit. Tällä hetkellä käytetyn WLAN-standardin on IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11, joka määrittelee langattoman tiedonsiirron toimintaperiaatteet OSI-mallin fyysi-

sellä ja siirtoyhteyskerroksella. Seuraavissa luvuissa käydään läpi muutamia perusasioita käsitteistöön liittyen sekä esitellään langattomien lähiverkkojen tämänhetkisiä tulevaisuudennäkymiä.

2.1 Langattomiin lähiverkkoihin liittyvää käsitteistöä

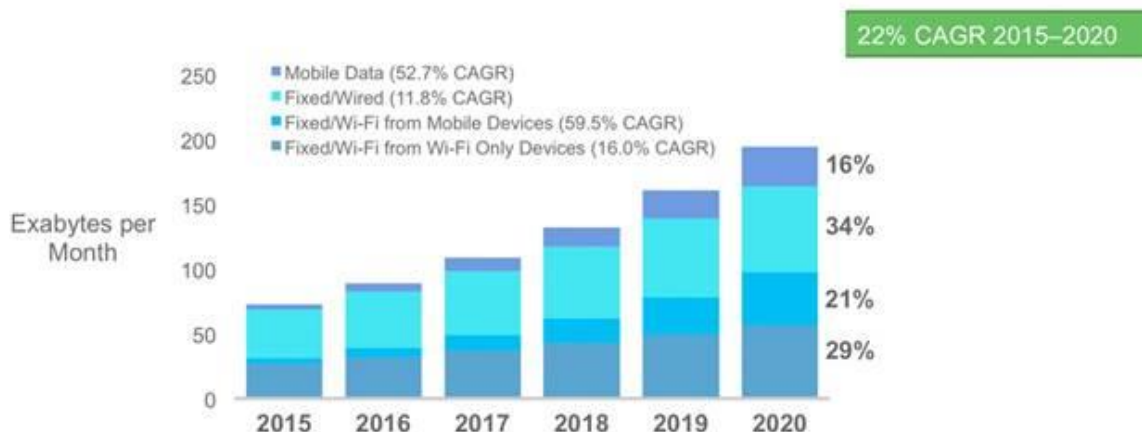
Arkikielessä termejä WLAN, Wi-Fi ja IEEE 802.11 käytetään usein toistensa synonyymeina, vaikka ne ovat teknisesti ottaen eri asioita. WLAN on kattonimike kaikille langattomille lähiverkkoteknologioille, IEEE 802.11 on yksittäinen WLAN-standardi ja Wi-Fi on tavaramerkki – joskin Wi-Fi:ssä WLAN-toiminnallisuus on toteutettu 802.11-standardin mukaisesti. Wi-Fi-tavaramerkillä varustetut laitteet ovat keskenään yhteensopivia ja noudattavat teollisuudessa yleistyneitä käytäntöjä [2]. Tavaramerkkiä hallinnoi laitevalmistajien muodostama liitto, Wi-Fi Alliance, joka suorittaa uusille markkinoille tuotaville laitteille yhteensopivuustestauksia. Wi-Fi-sertifioidut laitteet ovat keskenään yhteensopivia myös vanhempiin 802.11-versioihin perustuvien laitteiden kanssa.

IEEE päivittää standardejaan laajennuksilla (engl. amendment), joissa kuvataan aikaisempiin versioihin tehtävät muutokset, esimerkiksi mitkä toiminnot poistuvat käytöstä ja mitä uutta päivityksen yhteydessä lisätään. IEEE 802.11 -standardin ensimmäinen versio on 802.11-1997, jossa jälkimmäinen numerosarja on standardin julkaisuvuosi. Laajennukset nimetään standardin loppuun liitettävällä kirjaimella tai kirjainyhdistelmällä, esimerkiksi 802.11i-2004 on 802.11-standardin tietoturvalaajennus. Ajoittain kaikki kertyneet muutokset yhdistetään, ja standardi julkaistaan kokonaisuudessaan uudelleen – viimeisin 802.11-standardin uusintaversio on 802.11-2016, joka sisältää muun muassa edellä mainitun tietoturvalaajennuksen [3]. Huomionarvoista on, että 802.11-standardiperheen laajennuksista puhutaan usein standardeina, vaikka IEEE:n näkökulmasta ne eivät olekaan omia, itsenäisiä standardejaan: esimerkiksi 802.11n-standardi tai 802.11ac-standardi (tässä työssä myös lyhyesti n- tai ac-standardi). Myös tässä työssä käytetään edellä mainittuja vakiintuneita termejä.

2.2 Tulevaisuudennäkymiä

Langaton liikenne on kasvussa mobiililaitteiden ja muiden langattomien laitteiden käytön yleistyessä. Suuri osa kasvusta kohdistuu WLAN-verkkoihin, joiden tiedonsiirtonopeuden ja kapasiteetin kasvattaminen on yksi IEEE 802.11 -standardin keskeisimpiä kehityssaiheita. Lähitulevaisuudessa WLAN-verkkojen suorituskykyä aiotaan parantaa tiheissä ympäristöissä, joissa langattomia päätelaitteita on paljon suhteessa tukiasemiin (esimerkiksi langattomat toimistotilat, lentokentät tai julkiset hot-spotit). Tätä varten IEEE on kehittänyt laajennusta 802.11ax, jonka arvioidaan valmistuvan vuonna 2018. [3; 4.]

Cisco VNI:n (Visual Networking Index) helmikuussa 2017 julkaiseman ennusteen mukaan globaali IP-liikenne tulee kasvamaan noin 22 % vuosivauhtia vuoteen 2020 saakka. Kuvassa 1 on Cisco VNI:n globaalin IP-liikenteen kasvukehityssennuste, jossa on eritelty mobiiliin ja kiinteään laajakaistan sekä langattoman ja langallisen liikenteen osuudet kokonaisliikenteestä. Ennusteen mukaan suurin osa kasvukehityksestä tulee tapahtumaan langattomissa verkoissa. Lisäksi kasvu tulee olemaan nopeinta juuri WLAN-verkoissa: ennusteen mukaan Wi-Fi-yhteensopivat päätelaitteet tulisivat tuottamaan globaalista IP-liikenteestä puolet vuonna 2020. Cisco VNI:n mukaan myös IoT-laitteiden yleistymisen tulee osaltaan vaikuttamaan langattoman liikenteen kasvuun. [5; 6.]



Kuva 1. Cisco VNI:n ennuste globaalin IP-liikenteen kasvukehityksestä. IP-liikenne sisältää Internetin lisäksi myös liikenteen, joka ei lähe palveluntarjoajan verkosta. Wi-Fi:n kautta kulkeva IP-liikenne on eritelty mobiililaitteiden ja pelkästään Wi-Fi:ä käyttävien laitteiden tuottamaan liikenteeseen.

Wi-Fi Alliancen toisen aallon 802.11ac-laitteille julkaiseman sertifiointiohjelman myötä MU-MIMO-yhteensopivat päätelaitteet tulevat yleistymään. Tällä hetkellä Wi-Fi Alliancen

verkkosivun laitehaulla löytyy yli kaksisataa sertifioitua toisen aallon ac-laitetta; IHS Markitin julkaiseman raportin mukaan vuoden 2016 kolmannessa kvartaalissa globaalisti viedystä tukiasemista 10 % oli toisen aallon ac-tukiasemia [7]. Myös WLAN-verkot pilvipohjaisella hallintajärjestelmällä, kuten esimerkiksi Ciscon Meraki-tuoteperhe mitä luultavimmin yleistyvät lähitulevaisuudessa.

3 IEEE 802.11 -standardi

Seuraavissa luvuissa esitellään 802.11-standardiperhe ja käydään läpi langattomien lähiverkkojen tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavia tekijöitä 802.11-standardin pohjalta. Lopuksi perehdytään tarkemmin 802.11n/ac-laajennuksien välisiin eroihin.

3.1 Arkkitehtuuri

802.11-standardi määrittelee langattoman tiedonsiirron OSI-mallin fyysisellä ja siirtoyhteyskerroksella taulukon 1 mukaisesti. MAC-kerros toimii siirtotien varauksessa, ja itse datan siirto fyysisten komponenttien kautta tapahtuu PLCP- ja PMD-kerroksilla. 802.11-standardin MAC/PLCP-kehysformaatit ovat erilaisia standardin eri versioissa. Esimerkiksi HT-formaatti (High Throughput) sisältää MAC/PLCP-kehysiin tehdyt 802.11n-spesifiset muutokset. [8; 9.]

Taulukko 1. 802.11-standardin protokollapinon arkkitehtuuri [8, taulukko 10-1].

OSI-mallin taso 2: Siirtoyhteyskerros	MAC (Media Access Control)	CSMA/CA
OSI-mallin taso 1: Fyysinen kerros	PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)	802.11: DSSS, FHSS 802.11g: ERP-OFDM
	PMD (Physical Medium Dependent)	802.11n/ac: MIMO-OFDM

802.11-standardi käyttää MAC-kerroksella siirtotien varausmenetelmänä CSMA/CA-protokollaa. CSMA/CA jakaa langattoman siirtotien törmäysten välttämiseksi siten, että kanavalla voi lähettää vain yksi laite kerrallaan. 802.11-standardissa on kolmentyyppisiä MAC-kehyskiä: hallinta, ohjaus ja data (engl. management, control ja data). Hallintakehyksiä käytetään päätelaitteen ja tukiaseman välisen yhteyden muodostamisessa, ohjauskehyksiä tiedonsiirtoon liittyvien asetusten määrittelyyn ja datakehykset kuljettavat datapaketteja OSI-mallin ylemmiltä kerroksilta [10]. Esimerkiksi CSMA/CA-protokollassa

langaton päätelaite käyttää kanavan varaamiseen ohjauskehyksen alatyyppejä RTS (Request to Send), ja tukiasema kuittaa pyynnön CTS-kehyksellä (Clear to Send) [8].

OSI-mallin fyysisen kerroksen PLCP-alikerros lisää oman kehyksensä MAC-kehyksen jälkeen. PLCP-kehyksessä määritellään fyysisen kerroksen parametreja, jotka muun muassa kertovat vastaanottajalle MAC-kehyksen pituuden, käytössä olevan modulaation ja beamforming-asetuksia [11]. PMD ei lisää erillistä kehystä PLCP-kehyksen jälkeen, vaan kuvaa siirtotien ja fyysiset komponentit [8].

802.11-standardissa määritellään myös erilaisiin käyttöympäristöihin soveltuvia verkkoarkkitehtuureja. BSS (Basic Service Set) on yksinkertainen arkkitehtuuri, jossa yksi tai useampi laite on kytkeytynyt toisiinsa langattomasti. Luvun 5.4 kuvassa 2 on BSS-arkkitehtuurin mukainen verkko, jossa langattomaan reitittimeen on liittynyt yksi langaton päätelaite. Laajemmissa verkkoympäristöissä voidaan käyttää ESS-arkkitehtuuria (Extended Service Set), jossa BSS-arkkitehtuurin mukaisia verkkoja voidaan yhdistää toisiinsa kiinteään verkkoinfrastruktuurin kautta. ESS mahdollistaa muun muassa langattoman verkon kaiuttamisen kahdesta tai useammasta tukiasemasta. Tukiasemakontrolleripohjaisten WLAN-verkkojen, joissa useamman tukiaseman hallinta on keskitetty kontrollerille, voidaan sanoa olevan ESS-verkkoarkkitehtuureja. [11.]

3.2 Taajuusalueet ja kanavajako

WLAN-verkot toimivat lisensoimattomilla ISM-radiotaajuusalueilla 2,4 GHz ja 5 GHz. Alkuperäinen 802.11-standardi määrittelee myös infrapunalla toimivan fyysisen kerroksen, mutta infrapunalla toimivat WLAN-laitteet eivät aikanaan saavuttaneet suurta suosiota laitevalmistajien keskuudessa [8]. Infrapunalla toimivan tiedonsiirron määrittelyt onkin kokonaan poistettu uusimmasta standardiversiosta 802.11-2016 [11].

Tarkat kanavajaot vaihtelevat maanosasta riippuen ja käytössä olevat kaistanleveydet taas vaihtelevat 802.11-standardin eri versioissa taulukon 2 mukaisesti. Taulukossa 2 vertaillaan 802.11-standardin laajennuksia, joiden tarkoituksena on ollut uudistaa fyysistä kerrosta ja nostaa tiedonsiirtonopeutta. Taulukossa esitetään käytössä oleva taajuusalue, kaistanleveys, modulaatio sekä teoreettiset maksiminopeudet.

Taulukko 2. 802.11-standardiperheen vertailua [8].

Standardi	Taajuusalue	Kaistanleveys	Modulaatio	Maksiminopeus
802.11-1997	2,4 GHz	5 MHz, 1 MHz	DSSS, FHSS	2 Mb/s
802.11a-1999	5 GHz	20 MHz	OFDM	54 Mb/s
802.11b-1999	2,4 GHz	5 MHz	HR/DSSS	11 Mb/s
802.11g-2003	2,4 GHz	20 MHz	DSSS, OFDM	54 Mb/s
802.11n-2009	2,4 GHz ja 5 GHz	20/40 MHz	MIMO-OFDM	600 Mb/s
802.11ac-2013	5 GHz	20/40/80/160 MHz	MIMO-OFDM	6,9 Gb/s

Euroopassa 2,4 GHz:n taajuusalue on jaettu 13 kanavaan, joiden keskitaajuuudet jakaantuvat taajuusalueelle 5 MHz:n välein. Ei-päällekkäisiä 20 MHz:n kanavia taajuusalueella on maksimissaan kolme (esimerkiksi 1, 6 ja 11). 5 GHz:n taajuusalueella 20 MHz:n ei-päällekkäisiä kanavia on puolestaan käytössä yhteensä 19. [9.]

3.3 Modulaatiomenetelmät

802.11-standardin eri versioissa käytetään tiedonsiirtoon luvun 3.2 taulukon 2 mukaisia laajakaistaisia modulointimenetelmiä. Standardin ensimmäisessä versiossa on määriteltä kaks vaihtoehtoista modulaatiomenetelmää, DSSS eli suorasekvensointi ja FHSS eli taajuushyppely, joista DSSS on käytössä myös b- ja g-standardeissa. DSSS ja FHSS ovat hajaspektritekniikoita, joissa alkuperäinen signaali hajautetaan sitä paljon suuremmalle kaistanleveydelle [12]. Signaalin lähettämiseen käytetään yhtä kantoaaltoa. Taajuushyppelyssä muutetaan kantoaallon taajuutta pseudosatunnaisessa järjestyksessä, joka on lähettäjän ja vastaanottajan tiedossa. Suorasekvensoinnissa alkuperäinen signaali moduloidaan digitaalisesti suurempitaajuisella, pseudosatunnaisesti generoidulla signaalilla, joka on niin ikään lähettäjän sekä vastaanottajan tiedossa. DSSS on sietokykyisempi häiriöille kuin FHSS ja mahdollistaa suuremmat maksimitiedonsiirtonopeudet. DSSS ei kuitenkaan ole riittävän tehokas modulointimenetelmä 802.11b-standardin maksimisiirtonopeutta (11 Mb/s) suuremmille tiedonsiirtonopeuksille, koska se ei pysty hyödyntämään kaistaa riittävän tehokkaasti. [8.]

OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) eli monikantoaaltomodulointitekniikka sen sijaan hyödyntää taajuuskaistan koko spektrin tehokkaasti. OFDM-modulaatiota käytetään 802.11a/g/n/ac-standardeissa. OFDM:ssä samalla kanavalla lähetetään useita kantoaaltoja, joiden kaistanleveys on 312,5 kHz [11]. Kantoaallot ovat keskenään

ortogonaalisia: kun ne esitetään amplitudi-taajuuskoordinaatistossa, yksittäisen kantoaallon keskitaajuudella muiden kantoaaltojen amplitudi on nolla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kantoaallot voidaan yhdistää yhdeksi laajakaistaiseksi signaaliksi ja lähettää samanaikaisesti. [8.] Taulukossa 3 on esitetty 802.11-standardin eri versioissa käytettyjen OFDM-kantoaaltojen lukumäärät. Osaa kantoaalloista, niin kutsuttuja pilot-kantoaaltoja, OFDM käyttää siirtotien mittaamiseen, eivätkä ne siirrä hyötykuormaa. Taulukosta nähdään, että suuremmilla kaistanleveyksillä pilot-kantoaaltojen suhteellinen lukumäärä pienenee – suuremmat kaistanleveydet siis hyödyntävät siirtotien tehokkaammin. [9.]

Taulukko 3. Taulukossa on esitetty OFDM-kantoaaltojen määrä eri 802.11-versioissa. Data-sarakkeessa on datansiirtoon käytettyjen kantoaaltojen määrä ja pilot-sarakkeessa pilot-kantoaaltojen prosenttiosuus kantoaaltojen kokonaislukumäärästä. [9, taulukko 2-1.]

Standardi	Data	Yhteensä	Pilot
802.11a/g	48	52	8 %
802.11n/ac, 20 MHz	52	56	7 %
802.11n/ac, 40 MHz	108	114	5 %
802.11ac, 80 MHz	234	242	3 %
802.11ac, 160 MHz	468	484	3 %

OFDM:ssä jokainen kantoaalto siirtää yhden symbolin, joten se mahdollistaa usean symbolin samanaikaisen lähettämisen. Lähetettävän symbolin pituus on 3,2 mikrosekuntia. Perättäisten symbolien väliin lisätään joko 800 ns tai 400 ns pitkä suojaväli (engl. guard interval), jotta peräkkäiset symbolit eivät menisi päällekkäin, jos siirtotiellä on viivettä. OFDM-kantoaaltoja moduloimalla yksi symboli voi koodata useita bittijä. Langaton siirtotie on kuitenkin altis häiriöille, joten 802.11-standardi käyttää fyysisellä kerroksella virheenkorjauskoodia, jotka lisäävät datavuohon redundantteja bittijä. Databittien ja koodattujen bittien suhde riippuu käytössä olevasta virheenkorjauskoodista. 802.11n/ac-standardissa käytössä oleva virheenkorjaus ja modulaatio ilmaistaan MCS-arvolla (Modulation and Coding Set). Esimerkiksi 802.11ac-standardissa MCS-arvo 7 tarkoittaa 64-QAM modulaatiota ja 5/6-koodausta. Tällöin yksi symboli sisältää kuusi bittijä ja viittä databittijä vastaa kuusi koodattua bittijä. [9; 13.]

3.4 Moniantennitekniikka

802.11n/ac-standardeissa käytetään moniantennitekniikkaa (MIMO), jonka avulla voidaan esimerkiksi parantaa tiedonsiirron nopeutta tai luotettavuutta. Moniantennitekniikassa käytetään nimen mukaisesti useampaa antennia signaalin lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Erilaisia lähetin-vastaanotin-yhdistelmiä kuvataan notaatiolla $T \times R : S$, jossa T on lähettimien lukumäärä, R vastaanottimien lukumäärä ja S erillisten datavirtojen lukumäärä [13].

Tällä hetkellä yleisimmin käytetty MIMO-tekniikka, jolla voidaan parantaa tiedonsiirtonopeutta, on spatiaalinen multipleksaus (engl. spatial multiplexing) tai lyhyesti SM. SM-tekniikassa monitie-etenemistä hyödyntämällä yhdellä kanavalla voidaan siirtää useita datavirtoja (engl. data stream) samanaikaisesti. Jokaista datavirtaa kohden tarvitaan erillinen lähettäjä-vastaanottajapari, joiden välillä lähetettävä signaali jaetaan. SM moninkertaistaa teoriassa tiedonsiirtonopeuden, kun esimerkiksi 20 MHz:n levyisellä kaistalla voidaan lähettää useampi OFDM-moduloitu datavirta yhden sijasta. [13.]

Tiedonsiirron luotettavuuden parantamiseksi voidaan käyttää STC-tekniikkaa (space-time code), jossa yksi datavirta lähetetään useammasta antennista, jolloin se kulkeutuu vastaanottajalle useampaa eri reittiä. STC-tekniikassa lähettimien ja vastaanottimien lukumäärien ei kuitenkaan tarvitse olla samat, kunhan lähetäviä antenneja on enemmän tai vähintään saman verran kuin vastaanottavia. STC-tekniikkaa voidaan hyödyntää esimerkiksi tilanteissa, joissa radiotiellä on paljon esteitä ja häiriöitä; useita eri reittejä vastaanottajalle kulkeutuva signaali saapuu varmemmin kokonaisuudessaan perille ja useammalla antennilla vastaanotettaessa voidaan saada parempi kuuluvuus vastaanotettavaan signaaliin. [13.]

Beamforming-tekniikan avulla voidaan kohdentaa lähetyksenergia vastaanottajalle ja siten parantaa signaalin kantamaa. Lähettäjä ja vastaanottaja arvioivat lähetyksen vaihetta ja tehoa dynaamisesti siten, että signaalien interferenssi on konstruktiiivista halutussa kohteessa. Beamforming-tekniikkaa voidaan käyttää sekä SU-MIMO (single user MIMO) että MU-MIMO (multi user MIMO) tiedonsiirrossa. MU-MIMO-tekniikalla tukiasema pystyy lähettämään useita datavirtoja eri päätelaitteille samanaikaisesti, mutta myös päätelaitteiden on oltava MU-MIMO-yhteensopivia. MU-MIMO-teknologia on vasta tulolla eikö ole yhtä laajassa käytössä kuin esimerkiksi spatiaalinen multipleksaus. [9.]

3.5 Tietoturva

WLAN-verkkojen tietoturvaratkaisuihin kuuluu erilaisia salaus- ja todentamismenetelmiä. 802.11-standardissa siirrettävän datan salaus ja todentaminen tehdään MAC-kerroksella, mutta salaukseen ja todentamiseen voidaan käyttää myös verkkokerroksella toimivia protokollia. Seuraavaksi käydään lyhyesti läpi WLAN-verkkoon liittyminen sekä 802.11-standardin keskeisimpiä salaus- ja todentamismenetelmiä.

802.11-standardin mukainen verkkoon liittyminen tapahtuu kahdessa vaiheessa. Päätelaitteen tulee autentikoitua ja assosioitua tukiasemalle, ennen kuin se voi siirtää dataa verkossa. Tukiasemalle autentikointisessa vaihtoehtoina on avoin autentikaatio (engl. open authentication) tai WEP-protokollaan perustuva jaetun avaimen todentaminen (engl. shared key authentication). Avoimessa autentikaatiossa on kaksi vaihetta, joista ensimmäisessä päätelaite lähettää hallintakehyksessä autentikointispyynnön tukiasemalle ja toisessa tukiasema vastaa hyväksymällä laitteen verkkoon. Jaetun avaimen todentaminen puolestaan on vanhentunut ja haavoittuvainen todentamismenetelmä. Tämän vuoksi on suositeltavaa käyttää avointa autentikaatiota ja toteuttaa laitteiden luotettava todentaminen muilla menetelmillä. Käytännössä laitteiden luotettava todentaminen tapahtuu siis vasta autentikaation ja tukiasemalle assosioitumisen jälkeen. [8.]

Ensimmäisessä 802.11-versiossa salausmenetelmäksi on määritelty WEP (Wired Equivalence Privacy), joka perustuu jaettuun salausavaimeen ja RC4-salausalgoritmiin. Sitten 802.11-standardin tietoturvaa on uudistettu laajennuksella 802.11i-2004 WEP-protokollassa havaittujen haavoittuvaisuuksien vuoksi. 802.11i-tietoturvamäärittelyitä noudattavia WLAN-verkkoja nimitetään RSN-verkoiksi (Robust Security Network). RSN-verkoissa on uudistettu sekä todentamismenetelmät että salausavainten hallinta ja salausalgoritmit. Lisäksi otetaan käyttöön 802.1X-protokolla, joka mahdollistaa käyttäjän todentamisen autentikointipalvelimella. Päätelaitteen ja autentikointipalvelimen välillä käytetään EAP-protokollaa. 802.1X-protokollan käyttöönotto yksinkertaistaa WLAN-verkkojen hallintaa, kun jokaiselle päätelaitteelle ei tarvitse erikseen määritellä jaettua avainta. Wi-Fi Alliancen WPA- ja WPA2-salausprotokollat perustuvat 802.11i-standardiin. WPA-protokolla käyttää TKIP-salausta ja WPA2-protokolla CCMP-salausta. CCMP perustuu AES-salausalgoritmiin. WPA kehitettiin väliaikaiseksi ratkaisuksi vanhemmille laitteille, joiden suorituskyky ei ollut riittävä CCMP-salauksen käyttämiseen. Tämän hetken tietoturvallisin ratkaisu on WPA2 vahvalla jaetulla avaimella tai 802.1X-todentamisella. [10.]

3.6 802.11n ja 802.11ac

802.11n ja 802.11ac määrittelevät tällä hetkellä 802.11-standardiperheen suurimmat maksimitiedonsiirtonopeudet. Ac syrjäytti virallisesti julkaisunsa jälkeen n:n. Käytännössä olemassa oleva laitekanta päivittyy vähitellen. Ciscon vuonna 2016 tekemän ennusteen mukaan yli 90 % uusista WLAN-laitteista tulee olemaan ac-yhteensopivia vuoteen 2020 mennessä [6].

802.11n/ac-standardien keskeisimpiä uudistuksia 802.11b/a/g-standardeihin verrattuna ovat MIMO-tekniikka, kanavien yhdistäminen ja tehokkaampi modulaatio. Kanavien suurempi kaistanleveys lisää OFDM-kantoaaltojen määrää ja modulaatio määrittelee, kuinka monta bittiä yksi OFDM-symboli sisältää. Kanavien yhdistämisestä on eniten hyötyä 5 GHz:n taajuusalueella, koska 80 MHz:n ja 160 MHz:n levyiset kanavat eivät mahdu 2,4 GHz:n taajuusalueelle. Tästä syystä 802.11ac toimii vain 5 GHz:n taajuusalueella.

Taulukossa 4 on esitetty n- ja ac-standardien keskeisimmät erot, joilla on vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen. 802.11ac ottaa käyttöön suuremmat kaistanleveydet ja 256-QAM-modulaation, jossa yksi symboli koodaa 8 bittiä. Lisäksi ac-standardi tukee maksimissaan kahdeksaa MIMO-datavirtaa tukiasemalla. Tarkoituksena on MU-MIMO-tekniikan käyttöönotto, minkä ansiosta tukiasema pystyy viestimään yhtä aikaa useille päätelaitteille. MU-MIMO siis parantaa WLAN-verkon kapasiteettia. Lisäksi 802.11ac pystyy määrittelemään käytettävän kaistanleveyden kehyskohtaisesti, toisin kuin 802.11n [9]. Jos esimerkiksi tukiasemalle on määritelty kaistanleveydeksi 40 MHz ja ensisijaiseksi kanavaksi on valittu 36, mutta tukiasema havaitsee viereisen kanavan 40 olevan käytössä, skaalautuu kaistanleveydeksi automaattisesti 20 MHz. Kun viereinen kanava 40 on taas saatavilla, otetaan 40 MHz:n kaistanleveys uudelleen käyttöön. Ominaisuudesta on hyötyä, kun halutaan hyödyntää kanavien yhdistämistä ympäristöissä, joissa on muita häiritseviä WLAN-verkkoja.

Taulukko 4. IEEE 802.11n/a-standardien vertailu [9].

Standardi	802.11n-2009	802.11ac-2013
Kaistanleveydet	20 / 40 MHz	20 / 40 / 80 / 160 MHz
Modulaatio	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	lisää edellisiin 256-QAM modulaation
MIMO-datavirrat	max 4	Tukiasema max 8, päätelaitteet max 4
MU-MIMO	ei	kyllä (ei pakollinen)
MAC kehysformaatti	HT (High Throughput)	VHT (Very High Throughput)

Edellä mainittujen fyysisen tason määrittelyiden käyttöönottamiseksi myös MAC/PLCP-kehysformaatteja on uudistettu 802.11n/ac-standardissa. Tämän lisäksi kehysformaateihin on tehty muutoksia tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseksi. 802.11n käyttää HT-formaattia ja 802.11ac VHT-formaattia. Molemmissa formaateissa keskeisin tiedonsiirron tehokkuutta parantava tekijä on protokollakehysten yhdistäminen (engl. frame aggregation) A-MPDU- tai A-MSDU-aggregaateiksi, joista enemmän käytetty versio on A-MPDU. A-MPDU-aggregaateissa yhdistetään fyysisen tason kehyksiä, jolloin yhden PLCP-kehysten sisällä voidaan siirtää useita MAC-kehyksiä. 802.11ac-standardissa A-MPDU aggregaatin koko voi vaihdella 8 kilotavun ja yhden megatavun välillä, kun 802.11n-standardissa maksimikoko on 64 kilotavua. A-MSDU-aggregaateissa puolestaan yhdistetään PLCP:n lisäksi myös MAC-kehykset, jolloin yhden MAC-kehysten sisällä voidaan siirtää useampia IP-paketteja. A-MSDU on alttiimpi häiriöille, koska virheentarkistus tehdään kaikille yhdistetyille IP-paketeille, ja jos yhteenkin tulee matkan varrella virheitä, kaikki paketit on lähetettävä uudelleen. A-MSDU-aggregaatin maksimikoko on noin 11 kilotavua ac-standardissa ja noin 8 kilotavua n-standardissa. [9.]

Käytännössä eri WLAN-laitteissa 802.11n/ac-standardien ominaisuuksia on toteutettu vaihtelevasti. Taulukossa 5 on kuvattu Wi-Fi Alliancen n/ac-sertifioitujen laitteiden vähimmäisvaatimukset. 802.11ac-standardia noudattavat laitteet on tuotu markkinoille kahdessa vaiheessa tai ”aallossa”. Ensimmäisten luonnosstandardiin perustuvien 802.11ac-laitteiden tullessa markkinoille vuonna 2012, Wi-Fi Alliance ei ollut vielä julkaissut sertifiointiohjelmia ac-standardille [14], jolloin näitä laitteita ei ollut testattu Wi-Fi Alliancen toimesta. Tämän vuoksi varhaisissa ac-laitteissa saattaa esiintyä yhteensopivuusongelmia. IEEE ratifioi 802.11ac-standardin lopullisen version virallisesti vuonna 2013 [3] ja Wi-Fi Alliance julkaisi ensimmäisen aallon 802.11ac-sertifiointiohjelman samana vuonna.

Taulukko 5. Wi-Fi-sertifioitujen 802.11n/ac-laitteiden vähimmäisvaatimukset [2; 9].

802.11-versio	N	AC Wave 1	AC Wave 2
IEEE ratifioinnin pvm.	11/09/2009	18/12/2013	18/12/2013
Wi-Fi sertifioinnin pvm.	30/09/2009	19/06/2013	29/06/2016
Max. kaistanleveys	40 MHz	80 MHz	160 MHz
MIMO-datavirrat	vähintään 2	vähintään 3	vähintään 4
MU-MIMO	ei	ei	kyllä
5 GHz lisäkanavat	ei	ei	kyllä
Maksimisiirtonopeus	300 Mb/s	1,3 Gb/s	3,5 Gb/s

Kuten taulukosta 5 nähdään, toisen aallon ac-laitteet ovat tulleet markkinoille vuoden 2016 aikana. MU-MIMO:n kaikki hyödyt saadaan käyttöön vain WLAN-verkoissa, joissa on MU-MIMO-yhteensopivia päätelaitteita, joten jää vielä nähtäväksi, kuinka nopeasti kyseisen teknologian käyttö yleistyy.

160 MHz:n levyisten kanavien käyttö vie puolestaan suuren osan saatavilla olevasta radiokaistasta myös 5 GHz:n taajuusalueella, joten Wi-Fi Alliance suosittelee uusimmassa toisen aallon sertifiointiohjelmassa mahdollisimman monen radiokanavan käyttöä [2]. Kuitenkin esimerkiksi Suomessa Viestintäviraston päätöksen mukaisesti sallittuja kanavia on yhteensä 19, joiden käyttöä suurin osa laitevalmistajien tuotteista tukee jo ennestään [15].

4 Palvelunlaatu ja suorituskyky WLAN-verkoissa

4.1 Tiedonsiirtonopeus

Tiedonsiirtonopeudella tai systeemin läpisyötöllä (engl. throughput) tarkoitetaan siirretyn datan määrää aikayksikössä. Tiedonsiirtonopeuden yksikkö on bittiä per sekunti. Tämän periaatteen mukaisesti voidaan laskea teoreettinen arvo n- tai ac-standardin fyysisen kerroksen tiedonsiirtonopeudelle, kun tiedetään, kuinka monta bittiä siirtyy yhden OFDM-symbolin pituisella aikavälillä. Kyseinen aikaväli on joko 4 mikrosekuntia tai 3,6 mikrosekuntia riippuen symbolien välillä käytetyn suojavälin pituudesta. Esimerkiksi n-standardilla 20 MHz:n kaistanleveydellä datan siirtämiseen käytettävien OFDM-kantoaaltojen lukumäärä on 52 ja 64-QAM-modulaatiota käytettäessä jokainen kantoaalto siirtää 6 bittiä. Jos lisäksi käytetään 5/6-koodausta ja kahta MIMO-datavirtaa, saadaan tiedonsiirtonopeudeksi $\left(52 \times 6 \times \frac{5}{6} \times 2\right) \text{ b} \div 3,6 \mu\text{s} \approx 144 \text{ Mb/s}$. [16.]

Edellä kuvatulla laskutavalla saatu tiedonsiirtonopeus ei kuitenkaan suoraan vastaa systeemin läpisyöttöä, sillä fyysisellä kerroksella siirtyvien bittien määrä ei vielä kerro, kuinka paljon järjestelmä pystyy siirtämään hyötykuormaa. Suuri osa siirtotiellä kulkevista biteistä käytetään muun muassa datan kehystämiseen, yhteyden muodostamiseen ja uudelleenlähettyksiin. Esimerkiksi 802.11-standardin CSMA/CA-protokollan hallinta- ja ohjauskehykset eivät kuljeta sovelluserroksen kannalta lainkaan hyötykuormaa. Lisäksi radioympäristön häiriöt, säteilyä vaimentavat esteet sekä lähettäjän ja vastaanottajan

etäisyys toisistaan vaikuttavat langattoman signaalin kulkeutumiseen vastaanottajalle ja aiheuttavat virheitä tiedonsiirrossa. Myös WLAN-laitteiden ominaisuudet, kuten prosessointikyky (esimerkiksi MU-MIMO vaatii etenkin tukiasemalta monimutkaisia laskutoimituksia) ja komponenttien laatu asettavat rajoitteita WLAN-verkon läpisyötölle. Näistä tekijöistä aiheutuvasta lisäkuormituksesta (engl. overhead) johtuen tiedonsiirtonopeus on käyttäjän näkökulmasta yleensä huomattavasti fyysisen kerroksen teoreettista nopeutta hitaampi.

4.2 Palvelunlaadun vaatimukset

802.11n/ac-standardien uudistukset ovat kasvattaneet WLAN-verkon läpisyötön lisäksi myös kapasiteettia. Etenkin ac-standardi pyrkii parantamaan WLAN-verkon kapasiteettia MU-MIMO teknologian avulla. Joitakin sovelluksia, kuten HD-videota, lukuun ottamatta suurin osa sovelluksista ei tarvitse toimiakseen muutamaa megabittiä suurempaa kaistanleveyttä, vaan esimerkiksi jonkin kiinteän vähimmäiskaistan. Tästä syystä palvelunlaatuun on kiinnitettävä huomiota, kun WLAN-verkon kautta käytetään samanaikaisesti useita eri sovelluksia. Eri sovellusten palvelunlaadulliset vaatimukset pakettihäviökin, latenssin ja jitterin suhteen vaihtelevat, joten sovelluksia on tarvittaessa syytä priorisoida QOS-määrittelyiden avulla. Esimerkiksi reaaliajassa toimivat sovellukset, kuten VoWLAN sekä videoneuvottelusovellukset sietävät vain vähän viivettä ja jitteriä, minkä vuoksi niitä tulisi priorisoida muun liikenteen edelle. Suoratoistoon perustuva video sen sijaan sietää viivettä paremmin puskuroinnin ansiosta. [17.] 802.11e-2005-laajennuksessa on määritetty, miten liikenne voidaan WLAN-verkoissa jakaa eri QOS-luokkiin [3].

Langattomissa verkoissa myös signaalin kuuluvuus ja tukiaseman peittoalue vaikuttavat WLAN-verkon palvelunlaatuun. Signaalin kuuluvuuden tulisi olla aina suurempi kuin radioympäristön kohinatason. Signaali-kohinasuhde eli SNR on hyötysignaalin ja kohinatason dBm-arvojen välinen erotus, joka ilmoitetaan desibeleinä. Ciscon suositus signaali-kohinasuhteen riittävästä arvosta on VoWLAN-järjestelmille 25 dB ja datasiirrolle 20 dB [18].

WLAN-verkolle asetettavat vaatimukset vaihtelevat erilaisissa ympäristöissä. Laajoissa WLAN-verkoissa tukiasemien lukumäärä voi vaihdella muutamasta kymmenestä tukiasemasta aina satoihin asti. Näissä ympäristöissä on kiinnitettävä huomiota WLAN-verk-

kojen kapasiteettiin ja peittoalueeseen. Tukiasemien sijoittelu on tehtävä siten, että vierekkäiset tukiasemat eivät ole päällekkäisillä kanavilla. Jos tukiasemia on sijoitettava samaan rakennukseen useampia, tarvitaan vähintään 3–4 ei-päällekkäistä kanavaa, jotta tämä olisi mahdollista. 160 MHz:n kaistanleveyden hyödyntäminen laajoissa WLAN-verkoissa voikin olla ongelmallista siitä syystä, että ei-päällekkäisiä 160 MHz:n kanavia on toistaiseksi 5 GHz:n taajuusalueella vain kaksi. Kanavasuunnittelu on olennainen osa suurempien WLAN-ympäristöjen rakentamista. Kuluttajakäytössä taas kanavasuunnittelua tai tukiaseman sijoittelua ei tarvitse miettiä yhtä paljon – usein voidaan käyttää kanavan ja kaistanleveyden dynaamista määrittelyä, jossa tukiasema pyrkii valitsemaan parhaan mahdollisen yhdistelmän radioympäristön olosuhteiden mukaisesti. [9.]

5 Tiedonsiirtonopeustestit

5.1 Testeissä käytetyt laitteet

Testattavia tukiasemia oli yhteensä kolme, kaksi Ciscon kontrollerilla hallittavaa tukiasemaa sekä D-Linkin kuluttajakäyttöön suunnattu langaton reititin. Taulukossa 6 on esitetty testeissä käytettyjen tukiasemien tekniset tiedot.

Taulukko 6. Tukiasemien tekniset tiedot taulukoituna. Ac-moduulille ei löytynyt valmistajan verkkosivuilta tarkkaa julkaisupäivämäärää.

Valmistaja	D-Link	Cisco	Cisco
Malli	AC1750 DIR-868L	AIR-CAP3602I-E-K9	AIR-CAP3502I-E-K9
Moduuli	-	AIR-RM-3000-AC-E-K9 V01	-
Julkaisuvuosi	11/04/2013	03/10/2011, moduuli 2013	27/04/2010
Käyttöjärjestelmä	Hardware: A1 Firmware: 1.07	LWAPP image version 10.1.150.0	LWAPP image version 10.1.150.0
802.11-standardit	a/b/g/n/ac	a/b/g/n/ac	a/b/g/n
MIMO	3x3:3	3x3:3	2x2:2
Antennien lkm/tyyppi	6, single-band	3, dual-band	2, dual-band
Lankaverkko	4x Gigabit Ethernet	1x Gigabit Ethernet	1x Gigabit Ethernet

Ciscon LAP-tukiasemilla käytettiin kontrollerina Ciscon Catalyst 3850 -kytkintä, jossa on integroitu WLAN-tukiasemakontrolleri. 802.11n-standardin testeissä kytkimen käyttöjär-

jestelmä oli IOS XE 3.2.3.SE. 802.11ac-standardia testattaessa huomattiin, ettei kyseinen käyttöjärjestelmäversio ole ac-yhteensopiva, ja kytkin päivitettiin versioon IOS XE 3.3.0SE.

Päätelaitteina käytettiin testistä riippuen sekä WLAN-laboratorion pöytäkoneita että kahta kannettavaa tietokonetta. WLAN-laboratorion pöytäkoneet ovat muilta osin keskenään samanlaisia, mutta osaan koneista on asennettu langaton verkkokortti. Kyseinen langaton verkkokortti ei kuitenkaan ole ac-yhteensopiva eikä myöskään toiminut 5 GHz:n taajuudella Ciscon tukiaseman kanssa. Tästä johtuen sillä tehtiin vain yksi mittaus vertailun vuoksi. Muutoin käytettiin USB-verkkosovitinta. Laitteiden tekniset tiedot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Testeissä käytettyjen päätelaitteiden tiedot taulukoituna.

Päätelaite	HP Compaq 8200 Elite Microtower	Lenovo Ideapad 700	Fujitsu-Siemens Lifebook C1410 WL1
Käyttötarkoitus	Iperf-palvelin / Iperf-asiakas	Iperf-palvelin	Iperf-asiakas
Käyttöjärjestelmä	Windows 8	Windows 10	Ubuntu 14.04 LTS
Proessori	Intel® Core™ i5-2400 CPU @ 3.10GHz x 4	Intel® Core™ i5-6300HQ CPU @ 2.30GHz 2.30GHz	Genuine Intel® CPU T2300 @ 1,66 GHz x 2
RAM-muisti	8 GB	16 GB	1,5 GiB
WLAN	Linksys WMP600N Wireless-N PCI Adapter with Dual-Band	Intel® Dual Band Wireless-AC 3165	-
802.11-standardit	a/b/g/n	a/b/g/n/ac	-
MIMO	2x2:2	1x1:1	-

Testeissä käytetty USB-verkkosovitin oli TeleWellin TW-WLAN 802.11ac, jossa on kaksi antennia ja 2x2:2 MIMO-ominaisuus. Kaikki testeissä käytetyt ac-laitteet ovat ensimmäisen aallon laitteita ja perustuvat 802.11ac-luonnosstandardiin lukuun ottamatta Lenovo Ideapadin langatonta verkkokorttia.

5.2 Iperf

Iperf on tietoverkkojen suorituskyvyn testausta varten suunniteltu ilmainen työkalu, jolla voi mitata mm. tiedonsiirtonopeutta, viivettä ja jitteriä. Iperf on kevyt komentorivikäyttöinen ohjelma, jolla kahden päätelaitteen välistä tiedonsiirtoa testataan siten, että toinen päätelaitteista toimii Iperf-palvelimena ja toinen Iperf-asiakkaana. Asiakas ottaa yhteyttä

palvelimeen ja lähettää sille ohjelman generoimaa testidataa, jonka perusteella mittaukset tehdään. Asiakas mittaa lähetysnopeutta ja palvelin latausnopeutta. Iperfillä voi halutessaan testata myös tiedoston siirtoa päätelaitteiden välillä. Tällöin mittaustulokseen vaikuttaa myös tietokoneiden kovalevyjen luku- ja kirjoitusnopeudet.

Alkuperäinen Iperf-ohjelma on NLANR/DAST-työryhmän kehittämä ja julkaistu ensimmäisen kerran vuonna 2003. Iperf on vapaan lähdekoodin ohjelmisto ja siitä on julkaistu kaiken kaikkiaan kolme versiota: Iperf1.7.0, Iperf2.x ja Iperf3.x. [19.] Iperfille on tehty myös graafisia käyttöliittymiä, kuten Java-pohjainen Jperf. Iperf on saatavilla yleisimpiin käyttöjärjestelmiin (Linux/Unix, MacOS ja Windows). Lisäksi siitä on myös Android- ja IOS-versiot mobiililaitteille. Testauksiin valittiin Iperf3, koska se oli uusin saatavilla oleva versio, ja lisäksi ainoa jossa tulosteen tallentaminen lokitiedostoon onnistuu komentoon lisättävällä optiolla. Iperf3 on ESnetin ja Lawrence Berkeley Laboratorion kehittämä uusintaversio Iperfistä, jonka tarkoituksena on yksinkertaistaa koodia ja tarjota ohjelmakirjasto koodin uudelleenkäyttöä varten [20]. Iperf3 ei ole yhteensopiva aikaisempien Iperf-versioiden kanssa, joten sekä Iperf-asiakkaalla että Iperf-palvelimella on ajettava Iperf3-versiota. Tässä työssä käytetyn ohjelman tarkka versio on ensimmäisissä testeissä Iperf 3.1.2 ja viimeisissä testeissä Iperf 3.1.3.

Iperfillä voi määritellä tiedonsiirtoon liittyviä parametreja kuten valita, käytetäänkö TCP- vai UDP-protokollaa ja muuttaa niihin liittyviä arvoja. Esimerkiksi TCP-ikkunan ja UDP-paketin kokoa voi säätää tarpeen mukaan. Iperf mittaa TCP/UDP-protokollien hyötykuormaa, eli mittauksissa ei lasketa mukaan datan kehystämiseen käytettyjä bittejä.

5.3 Testien suunnittelu ja toteutus

Tiedonsiirtonopeustestien tavoitteena oli tutkia 802.11n/ac-standardien suorituskykyä siten, että mittaustulokset olisivat verrattavissa käyttäjän kokemaan palvelunlaatuun. Testien haluttiin myös olevan keskenään vertailukelpoisia. Tukiaseman etäisyys langattomasta päätelaitteesta oli kaikissa testeissä noin 2,5 metriä ja 2,4 GHz:n tai 5 GHz:n taajuusaluea testattaessa otettiin toisen taajuusalueen SSID kokonaan pois käytöstä. Tiedonsiirtonopeusmittaukset pyrittiin myös tekemään kaikille sallituille kaistanleveyksille erikseen järjestyksessä 20/40/80 MHz. Näiden toimintaperiaatteiden lisäksi kaikissa testeissä mitattiin vain langattoman päätelaitteen latausnopeutta, eikä lähetysnopeutta tutkittu.

Kaikissa tiedonsiirtonopeusmittauksissa käytettiin Iperfia. Seuraavaksi on esitetty cmd-komentoriviltä ajettavat esimerkkikomennot sekä Iperf-palvelimelle että Iperf-asiakkaalle, kun tiedonsiirtoprotokollana käytetään TCP:tä. Taulukossa 8 on myös käyty läpi esimerkkikomennoissa käytettyjen optioiden selitteet.

Iperf-asiakas esimerkkikomento:

```
.\iperf3 -c 10.10.30.10 -i 1 -t 300 -w 1024KB
```

Iperf-palvelin esimerkkikomento:

```
.\iperf3 -s -i 1 -f m -V --logfile .\cisco\n24-1
```

Taulukko 8. Esimerkkikomennoissa käytettyjen Iperf-optioiden selitteet.

-s	Ajetaan Iperf palvelin-moodissa
-c 10.10.30.10	Ajetaan Iperf asiakas-moodissa, palvelimen IP-osoite on 10.10.30.10
-i 1	Näytteenottoväli 1 sekunti
-t 300	Mittausaika 300 sekuntia
-w 1024KB	TCP-ikkunan koko 1024 KB
-f m	Ilmoittaa mittaustulokset yksikössä Mb/s
-V	Yksityiskohtaisempi tuloste (engl. verbose mode)
--logfile .\cisco\n24-1	Tallennetaan lokia tiedostoon .\cisco\n24-1

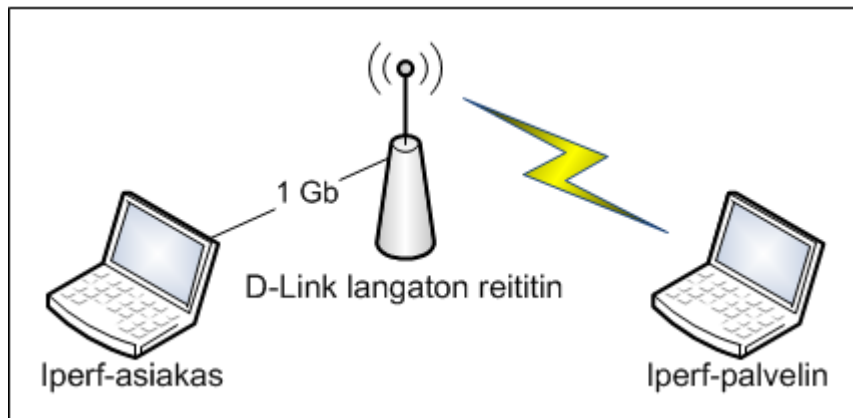
Tiedonsiirtonopeustestit tehtiin pääsääntöisesti TCP:llä, sillä suurin osa Internet-soveluksista käyttää TCP:tä tiedonsiirtoprotokollana. TCP-ikkunan kokoina oli joko 256 KB, 512 KB tai 1024 KB. Yksittäinen testi koostui kolmesta viiden minuutin mittauksesta näytteenottovälinä yksi sekunti. Muilta osin Iperfin oletusarvoja ei muokattu.

Tukiasemien suorituskykytestauksia tehtiin kahdessa osassa. Ensimmäiset mittaukset on tehty vuoden 2016 kevään aikana ja niissä on tutkittu tukiasemien tiedonsiirtonopeuksia. Mittauksia jatkettiin vuoden 2017 keväällä, jolloin tutkittiin tukiaseman suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä kuten salausta sekä dual-band-suorituskykyä. Tällöin tehtiin myös mittauksia UDP-protokollalla vertailun vuoksi.

Tiedonsiirtonopeusmittaukset tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun WLAN-laboratoriossa. Testausten aikana tilassa oli usein työskentelemässä myös muita opiskelijoita. Näitä henkilöitä on tarvittaessa pyydetty välttämään tukiaseman ja päätelaitteen välillä kulkemista testien aikana. Tilan häiriötasoa on tutkittu aikaisemmin ja näiden tutkimusten perusteella voitiin todeta sen vastaavan keskivertoa toimistotilaa, jossa ei ole suurta WLAN-kuormitusta (ks. luku 7). Tämä edisti osaltaan WLAN-laboratoriossa saatujen mittaustulosten välistä vertailukelpoisuutta.

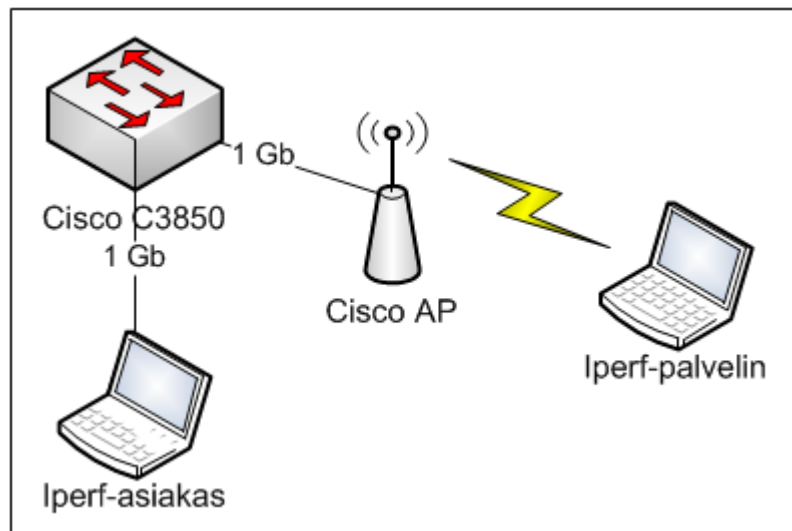
5.4 Testiverkot

Mittauksia varten rakennettiin kaksi testiverkkoa. D-Linkin langattoman reitittimen testiverkko on esitetty kuvassa 2. Reitittimen asetuksia voi muuttaa web-käyttöliittymän kautta. D-Linkin reitittimessä oli kaikissa tiedonsiirtonopeustesteissä käytössä WPA2-autentikaatio. Kanavan valinta oli määritelty dynaamiseksi, jolloin tukiasema pyrkii valitsemaan kanavan, jolla on vähiten häiriöitä. IP-osoitteet jaettiin DHCP:llä.



Kuva 2. D-Linkin langattoman reitittimen testitopologia.

Ciscon controlleripohjaisten tukiasemien tiedonsiirtonopeusmittauksia varten tehtiin kuvan 3 mukainen testiverkko. Controllerina käytettiin Cisco 3850-kytkintä, jossa on integroitu tukiasemakontrolleri. Kytkimeen konfiguroitiin myös erilliset VLAN-verkot päätelaitteille ja tukiasemille. Kaikissa VLAN-verkoissa jaettiin IP-osoitteet DHCP:llä.



Kuva 3. Ciscon tukiasemien testitopologia.

Ciscon Catalyst 3850 -kytkimen web-käyttöliittymä ei ollut Windows 8/10 -yhteensopiva, joten asetusten muuttaminen tehtiin komentorivin kautta. Esimerkiksi 802.11ac:n käyttöönotto onnistuu seuraavilla komennoilla [21]:

```

ap name <AP name> dot11 5g shutdown
ap name <AP name> dot11 5g channel 36
ap name <AP name> 31e6 dot11 5g channel width 80
ap name <AP name> no dot11 5 shutdown
  
```

Ennen asetusten muuttamista 5 GHz:n radio on otettava pois käytöstä. Valitsemalla kaistanleveydeksi 80 MHz, kontrolleri ottaa kyseiselle tukiasemalle käyttöön 802.11ac-protokollan automaattisesti. Ac-standardilla käytettiin kanavaa 36, muuten kanavan valinta oli määritetty dynaamiseksi. Mittauksissa otettiin tarpeen mukaan 2,5 GHz:n tai 5 GHz:n radio pois käytöstä tai vaihdettiin kaistanleveyttä. Muilta osin tukiasema oli oletusasetuksilla: esimerkiksi lähetysteho (TxPwr) on oletusarvoisesti 1 eli maakoodin perusteella asetettu maksimiarvo (100 mW) [16]. Ciscon tukiasemia testattaessa WLAN-verkossa oli käytössä avoin autentikaatio.

6 Mittaustulokset

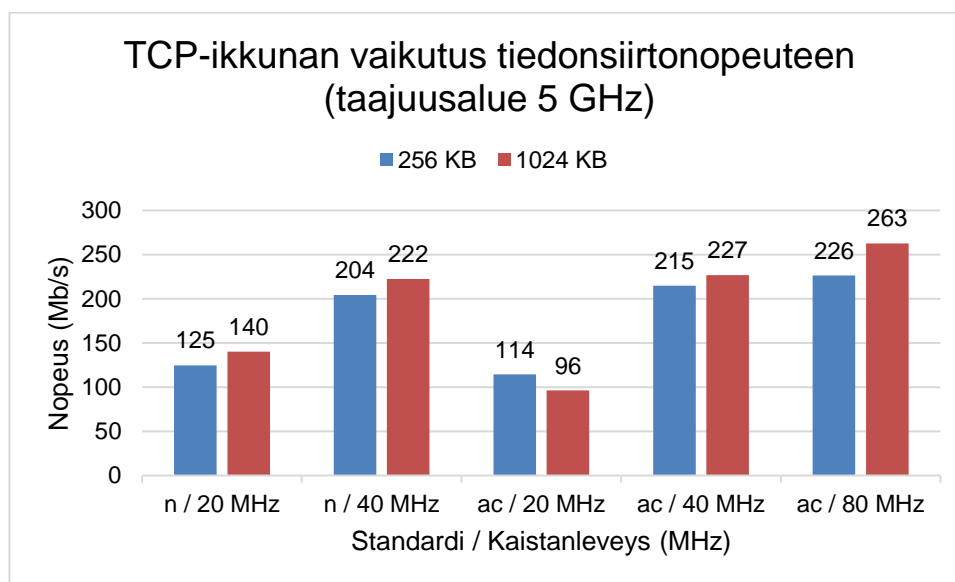
Seuraavissa luvuissa on esitetty tiedonsiirtonopeusmittauksien tulokset. Kaikista viiden minuutin mittausjaksoista on tehty myös kuvaajat – ne, joihin viitataan tekstissä, löytyvät

dokumentin liitteistä. Tiedonsiirtonopeuksien arvot on saatu laskemalla kolmen mittausjakson välinen keskiarvo ellei toisin mainita.

6.1 TCP-ikkunan vaikutus tiedonsiirtonopeuteen

TCP-ikkunan koon vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen testattiin tekemällä mittauksia 256, 512 ja 1024 kilotavun kokoisilla TCP-ikkunoilla. Mittaukset on tehty D-Linkin tukiasemalla ja USB-verkkoadapterilla. 2,4 GHz:n taajuusalueella 20 MHz:n kaistanleveydellä siirtonopeuksiksi saatiin 84 Mb/s, 97 Mb/s ja 105 Mb/s. 1024 kilotavun jälkeen ikkunan koon suurentaminen ei enää kasvattanut tiedonsiirtonopeutta. Tulosten perusteella päätettiin jättää 512 kilotavun TCP-ikkuna pois lopuista testeistä.

5 GHz:n taajuusalueella tehtyjen mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 4. Pääsääntöisesti siirtonopeus oli suurempi 1024 kilotavun kokoisella TCP-ikkunalla. 802.11ac-standardilla 20 MHz:n kaistanleveydellä saatiin kuitenkin suurempi tiedonsiirtonopeus 256 kilotavun kokoisella TCP-ikkunalla. Tästä johtuen kaikki loput mittaukset tehtiin sekä 1024 että 256 kilotavun kokoisilla TCP-ikkunoilla.



Kuva 4. TCP-ikkunan koon vaikutus tiedonsiirtonopeuteen. Mittaukset on tehty D-Linkin tukiasemalla ja 5 GHz:n taajuusalueella.

Taulukossa 9 on esitetty mittaustulokset myös Ciscon ac-tukiasemalla. Niin kuvasta 4 kuin taulukosta 9 nähdään, että 80 MHz:n kaistanleveydellä suurella TCP-ikkunan koolla näyttäisi olevan eniten positiivista vaikutusta siirtonopeuteen.

Taulukko 9. Cisco AIR-CAP3602I tukiasemalla mitatut tiedonsiirtonopeudet 1024 kilotavun ja 256 kilotavun kokoisilla TCP-ikkunoilla.

Cisco AIR-CAP3602I 802.11ac siirtonopeus (Mb/s)	256 KB	1024 KB
5 GHz / 80 MHz	221	247
5 GHz / 40 MHz	188	174
5 GHz / 20 MHz	108	104

Sekä kuvasta 4 että taulukosta 9 havaitaan, että 20 ja 40 MHz:n kaistanleveyksillä on puolestaan saatu hitaampia tiedonsiirtonopeuksia 1024 kilotavun kokoisella TCP-ikkunalla. Liitteen 1 kuvaajista 1–6 ja liitteen 2 kuvaajista 1–12 nähdään, että 256 kilotavun kokoisella TCP-ikkunalla tehdyissä mittauksissa on saatu varsin tasaisia tiedonsiirtonopeuksia, kun taas 1024 kilotavun ikkunalla hetkelliset nopeudet ovat vaihdelleet enemmän, mikä on laskenut keskiarvoa.

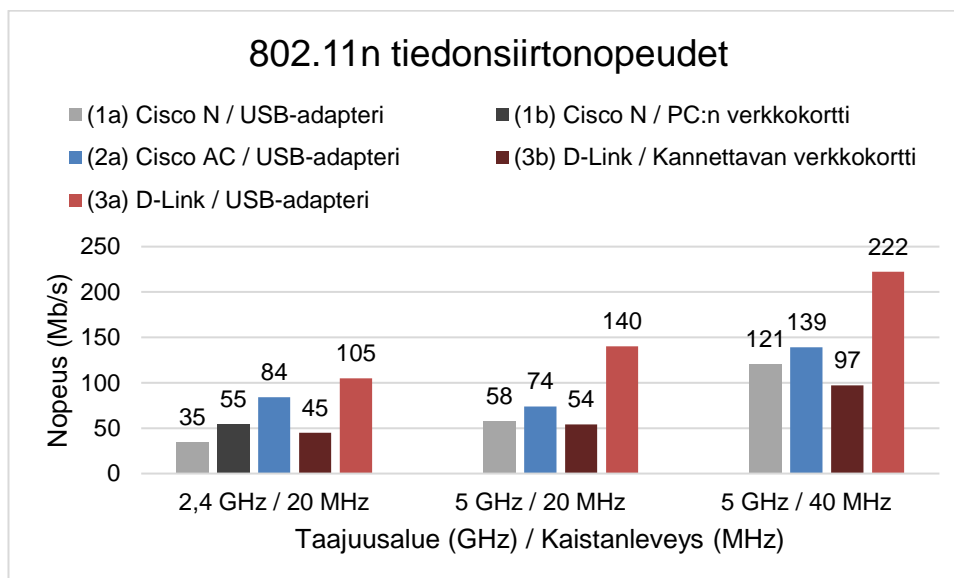
6.2 Tukiasemien sekä 802.11n/ac-standardien vertailu

D-Linkin langaton reititin oli testatuista tukiasemista selkeästi nopein kaikissa mittauksissa. Ciscon ac-standardin tukiasema AIR-CAP3602I oli seuraavaksi nopein ja vanhempi n-standardin malli AIR-CAP3502I puolestaan hitain. D-Linkin tukiasemaa testattiin USB-adapterin lisäksi myös kannettavan tietokoneen (Lenovo Ideapad) ac-verkkokortilla ja Ciscon n-standardin tukiasemalle tehtiin yksi mittaus WLAN-laboratorion pöytäkoneen n-verkkokortilla.

Kuvasta 5 nähdään, että 802.11n-standardilla nopeimmat mittaustulokset saatiin USB-adapterilla D-Linkin tukiasemalla. Ero on varsin merkittävä verrattuna Ciscon tukiasemiin. Myöhemmin kävi ilmi, että ainakin D-Linkin tukiasemalla on mitä luultavimmin ollut käytössä 256-QAM-modulaatio, vaikka sitä ei ole määritelty n-standardilla (ks. luku 7).

Kuvan 5 mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että 802.11n-siirtonopeudet vaihtelevat paljon. Sekä tukiasemien että päätelaitteiden välillä on merkittäviä eroja suoritus-

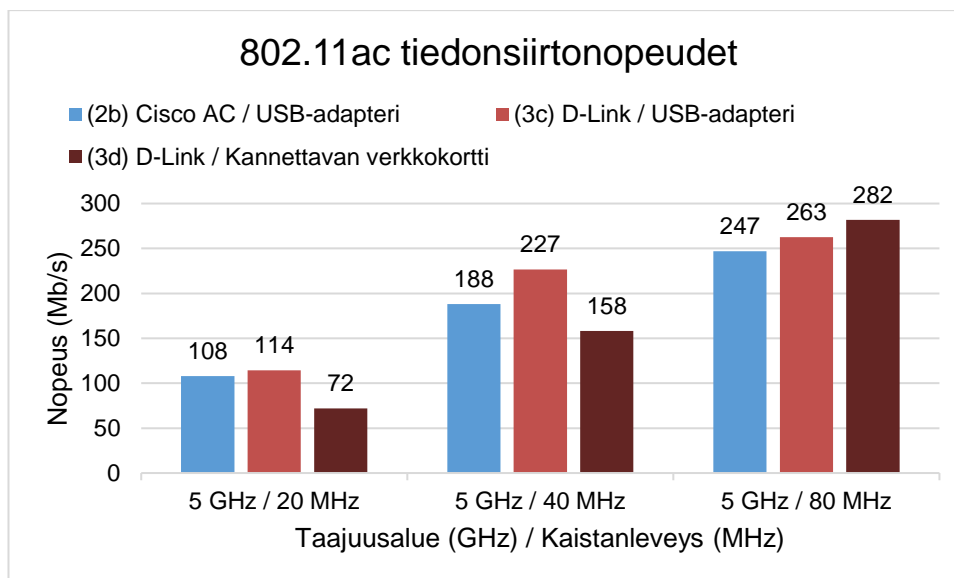
kyvyssä. Esimerkiksi mittauksissa (1a) ja (1b) on kahdesta MIMO-datavirrasta huolimatta saatu vain hieman korkeampia siirtonopeuksia kuin mittauksessa (3b), jossa on ollut käytössä vain yksi MIMO-datavirta.



Kuva 5. Kuvassa vertaillaan testitukiasemien tiedonsiirtonopeuksia 802.11n-standardilla. AIR-CAP3602I tukiaseman (Cisco AC) mittaukset on tehty aikaisemmassa projektissa eivätkä ne ole suoraan verrattavissa muihin mittauksilukuihin. Mittauksilukut on saatu tekemällä lperfillä seitsemän 20 sekunnin mittauksia ja laskemalla niiden keskiarvo [1].

802.11ac-standardilla tehtyjen tiedonsiirtonopeusmittauksien tulokset on esitetty kuvassa 6. Kaikista nopein mittauksiluku, 282 Mb/s, saatiin kannettavan ac-verkkokortilla 80 MHz:n kaistanleveydellä, vaikka verkkokortti pystyy hyödyntämään vain yhtä datavirtaa. USB-adapteri oli puolestaan verkkokorttia nopeampi 20/40 MHz:n kaistanleveyksillä tehdyissä mittauksissa. Mittauksilukujen perusteella vaikuttaisi siis siltä, että kahden datavirran hyödyntäminen nostaa tiedonsiirtonopeutta suhteessa enemmän 20 MHz:n ja 40 MHz:n kaistanleveyksillä kuin 80 MHz:n kaistanleveydellä.

Huomionarvoista on, että D-Linkin tukiasemalla 802.11ac-standardilla 20 MHz:n kaistanleveydellä tehdyissä mittauksissa hetkelliset tiedonsiirtonopeudet vaihtelivat varsin paljon, minkä vuoksi siirtonopeudeksi on saatu vain 114 Mb/s (ks. liite 1, kuvaajat 7–12). Liitteen 1 kuvaajista 7–12 kuitenkin nähdään, että mittauksissa on saavutettu 140 Mb/s siirtonopeus.



Kuva 6. Kuvassa vertaillaan AIR-CAP3602I:n ja DIR-868L:n tiedonsiirtonopeuksien keskiarvoja 802.11ac-standardilla.

Kun kuvien 5 ja 6 mittaustuloksia vertaillaan 802.11n/ac-standardien teoreettisiin maksimiirtonopeuksiin, havaitaan, että kahdella MIMO-datavirralla on paljon suurempi lisäkuorma kuin yhdellä datavirralla. Sekä Ciscon tukiasemalle että D-Linkin reitittimelle saadaan 80 MHz:n kaistanleveydellä lisäkuormaksi noin 70 %, jos kuvan 6 mittaustuloksia vertaa teoreettiseen maksiminopeuteen 866,7 Mb/s. Taulukossa 10 on vertailtu mittauksissa (3b) ja (3d) saatuja siirtonopeuksia teoreettisiin maksiminopeuksiin ja laskettu lisäkuormat niiden perusteella. Taulukosta nähdään, että yhdellä datavirralla lisäkuorma on vain noin 30 prosentin luokkaa. MIMO-datavirtojen lisäämisellä vaikuttaisi siis olevan paljon vaihtelevampi vaikutus verrattuna kaistanleveyden kasvattamiseen: esimerkiksi mittauksessa (3d) kaistanleveyden tuplaaminen on tuplannut myös siirtonopeuden.

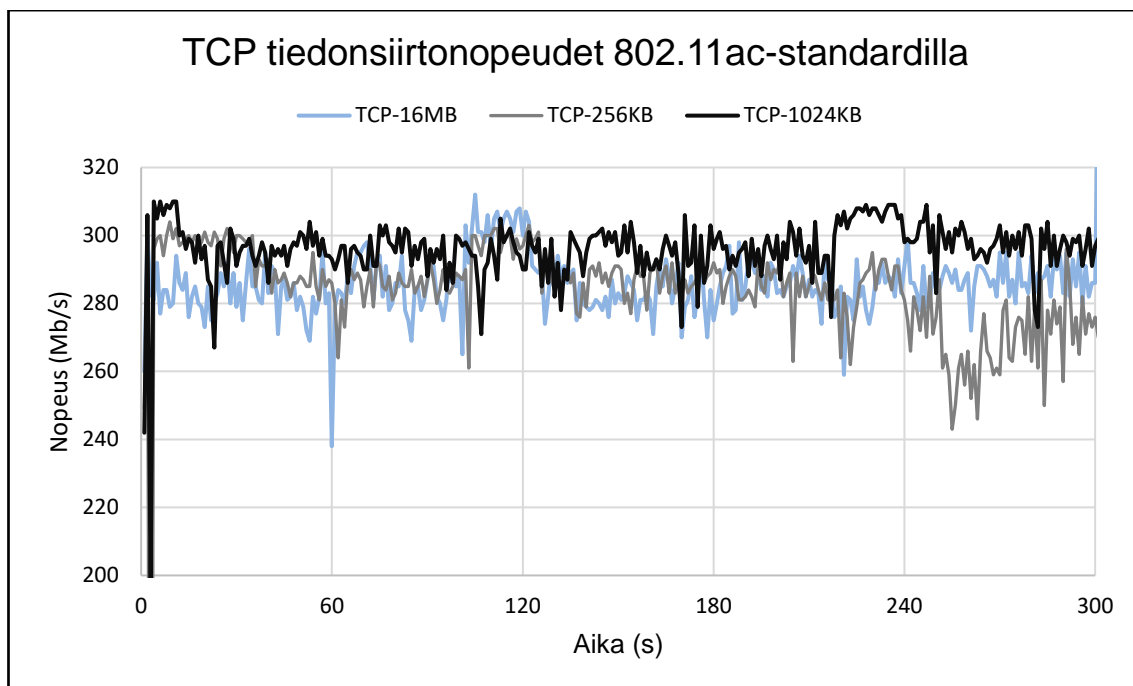
Taulukko 10. Siirtonopeus, teoreettinen maksiminopeus ja lisäkuorma D-Linkin tukiasemalla ja langattomalla ac-verkkokortilla tehdyistä mittauksista.

Mittaus	Standardi / Taajuusalue / Kaistanleveys	Nopeus (Mb/s)	Teoreettinen nopeus (Mb/s)	Lisäkuorma
(3b)	n / 2,4 GHz / 20 MHz	45	72,2	38 %
	n / 5 GHz / 20 MHz	54	72,2	25 %
	n / 5 GHz / 40 MHz	97	150	35 %
(3d)	ac / 5 GHz / 20 MHz	72	86,7	17 %
	ac / 5 GHz / 40 MHz	158	200	21 %
	ac / 5 GHz / 80 MHz	282	433,3	35 %

6.3 TCP/UDP-protokollien vertailu

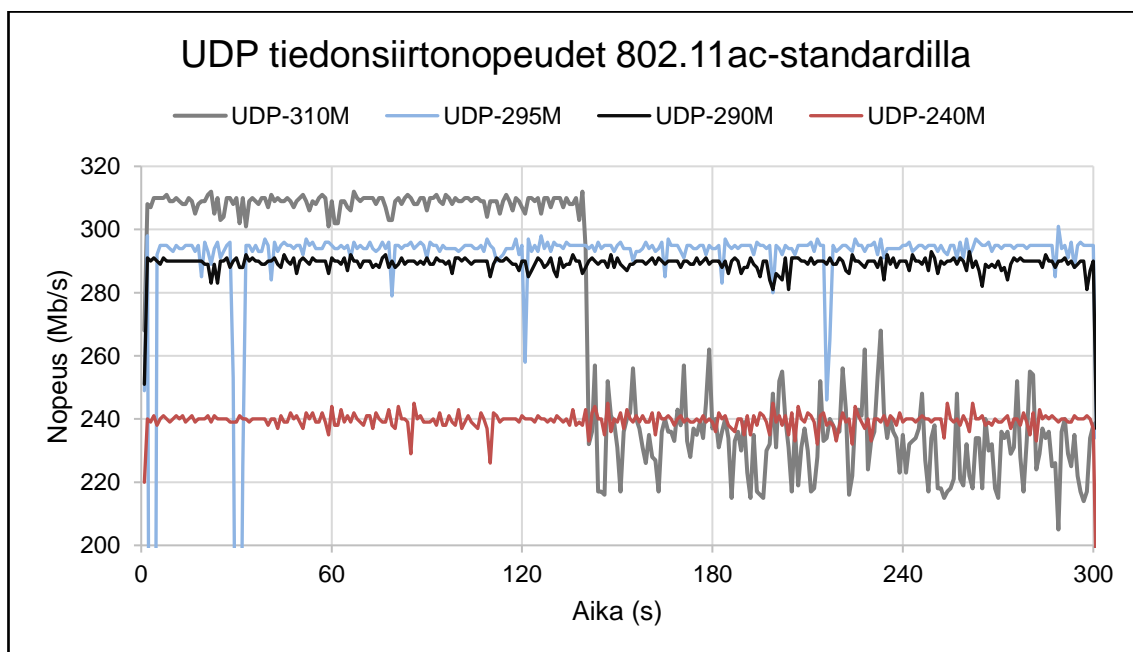
Kuvassa 7 on kolme 5 minuutin mittausta, jotka on tehty TCP-protokollalla. TCP-ikkunan koko oli joko 256 KB, 1024 KB tai 16 MB. Mittauksissa saatiin keskinopeuksiksi pienimmästä ikkunan arvosta suurimpaan lukien 284 Mb/s, 297 Mb/s ja 286 Mb/s. TCP-ikkunan ei siis kannata olla liian suuri tai pieni – arvio optimaalisesta koosta saadaan kertomalla tiedonsiirtonopeus läpimenoviivellä (engl. RTT, round trip time) [22]. Vastaavanlaisten UDP-protokollalla tehtyjen mittausten tulokset eri tavoitekaistanleveyksillä on puolestaan esitetty kuvassa 8.

Huomionarvoista on, että Iperfin UDP-testi luo vakionopeuksisen datavuon, joka ei suoraan vastaa minkään sovelluksen toimintaa, sillä UDP-paketit voivat olla erikokoisia sovelluksesta riippuen [19]. Tässä yhteydessä mittausten tarkoituksena on kuitenkin vain lähinnä demonstroida TCP- ja UDP-protokollien välisiä eroja: UDP on kevyt yhteydetön protokolla eikä vaadi kuittauksia vastaanotetuille paketeille, kun taas TCP:n ruuhkanhallintamekanismit ja häviötön tiedonsiirto aiheuttavat lisäkuormaa. TCP:ssä vastaanotetut paketit on kuitattava, ja jos paketteja häviää matkalla, TCP säätää ruuhkanhallintaikkunan kokoa automaattisesti pienemmäksi, jolloin paketteja on kuitattava vastaanotetuiksi useammin. Edellä kuvatun mukainen toiminta ei ole aina optimaalista WLAN-verkoissa, joissa pakettihävikki johtuu usein siirtotiellä tapahtuvista hetkellisistä häiriöistä eikä verkon ruuhkautumisesta. [23.] TCP-ruuhkanhallintaikkunan palautumiseen yhtä suureksi kuin ennen pakettihävikkiä voi mennä 1–5 sekuntia käytetystä ruuhkanhallintamekanismista riippuen, mikä näkyy tiedonsiirtonopeuden hetkellisinä vaihteluina [24].



Kuva 7. TCP-tiedonsiirtonopeudet kolmella erikokoisella TCP-ikkunalla.

Kuvista 7 ja 8 nähdään, että tiedonsiirtonopeuden hetkelliset vaihtelut ovat vähäisempiä UDP:llä kuin TCP:llä edellä kuvatun mukaisesti. Kun UDP:n tavoitenopeus on suurempi kuin 290 Mb/s, pakettihävikki kuitenkin kasvaa helposti niin suureksi, että mitattu siirtonopeus laskee merkittävästi.



Kuva 8. UDP-tiedonsiirtonopeudet neljällä eri tavoitekaistanleveydellä (M = Mb/s).

Taulukossa 11 on esitetty myös eri tavoitenopeuksilla tehtyjen UDP-mittauksien jitter, pakettihävikki sekä mitattu nopeus. Taulukosta nähdään, että pakettihävikki on ollut suurimmassa osassa mittauksia alle prosentin luokkaa, jolloin myös tavoitenopeuden ja mitatun nopeuden arvot eivät juurikaan eroa toisistaan.

Taulukko 11. UDP-mittauksissa saadut tavoitenopeutta vastaavat nopeuden, jitterin sekä pakettihävikin arvot.

Tavoitenopeus	Mitattu nopeus	Jitter	Pakettihävikki
180 Mb/s	178 Mb/s	0,178 ms	0,67 %
240 Mb/s	240 Mb/s	0,147 ms	0,0062 %
240 Mb/s (2)	239 Mb/s	0,162 ms	0,18 %
290 Mb/s	287 Mb/s	0,159 ms	0,88 %
290 Mb/s (2)	289 Mb/s	0,171 ms	0,27 %
295 Mb/s	290 Mb/s	0,167 ms	1,7 %
310 Mb/s	268 Mb/s	0,532 ms	14%

Viimeisen mittauksen, jossa tavoitenopeudeksi annettiin 310 Mb/s, puolella välissä pakettihävikki kasvoi noin 25 prosenttiin. Kun vaihteleva määrä paketteja kiinteästä datavirrasta tulee perille esimerkiksi ympäristön häiriöiden vuoksi, myös tiedonsiirtonopeuden hetkellisissä arvoissa alkaa esiintyä vaihtelua, kuten kuvasta 8 on havaittavissa.

6.4 D-Linkin langattoman reitittimen dual-band-suorituskyky

D-Linkin langattomassa reitittimessä on yhteensä kuusi antennia siten, että kummallakin taajuusalueella on käytössä kolme antennia. Erilliset antennit mahdollistavat sen, että reitittimellä voi hyödyntää samanaikaisesti sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuusalueita.

Taulukossa 12 on esitetty kolme tiedonsiirtonopeustestiä, jotka on tehty mittaamalla nopeutta Iperfillä siten, että 2,4 GHz:n SSID:seen yhdistettiin älypuhelimella ja 5 GHz:n SSID:seen Lenovon kannettavalla tietokoneella. Langattomilla päätelaitteilla ajettiin Iperf-palvelimia eri porteissa ja Fujitsu-Siemensin kannettavalla otettiin niihin yhteyttä samanaikaisesti. Vertailukohta-sarakkeessa on esitetty älypuhelimien ja kannettavan siirtonopeudet, kun WLAN-verkossa oli vain yksi langaton päätelaite. Mittauksissa 2 ja 3 tukiasemaa on käännetty suhteessa päätelaitteisiin, jotka olivat vastakkaisilla pöydillä noin 1,5 metrin päässä toisistaan. Molempien etäisyys tukiasemaan oli noin 2,5 metriä.

Älypuhelin oli tukiaseman suhteen vasemmanpuoleisella pöydällä ja kannettava tietokone oikean puoleisella pöydällä.

Taulukko 12. Dual-band testin aikana mitatut tiedonsiirtonopeudet (Mb/s).

Mittaus	Vertailukohta	Dual-band 1	Dual-band 2	Dual-band 3
Tukiaseman suunta	Vasemmalle	Vasemmalle	Keskelle	Oikealle
Älypuhelin	29	30	26	27
Kannettava	296	295	184	301

Vertailukohtana toimivan ja ensimmäisen mittauksen välillä ei ole havaittavissa vaikutusta suorituskykyyn, minkä perusteella voidaan todeta dual-band-tiedonsiirron toimivan moitteettomasti, kun käytössä on kaksi päätelaitetta, eivätkä ne ole kovin kaukana reititimestä. Aikaisemmassa tietoverkkoprojektissa on tutkittu D-Linkin reitittimen kapasiteettia 2,4 GHz:n taajuusalueella 20 MHz:n kanavalla [1]. Mittauksissa käytettiin WLAN-laboratorion pöytäkoneita ja yhtä tablettia. Testissä pystyttiin siirtämään 11 videostreamia Internetistä ongelmitta. Vasta kun 10 pöytäkoneelle lisättiin suuren tiedoston lataus, videoiden katselu ei enää ollut mielekästä. Näiden mittaustuloksien valossa on odotettavissa, että kahdella langattomalla päätelaitteella vaikutus tiedonsiirtonopeuteen ei ole kovin merkittävä.

Lyhyillä etäisyyksillä antennien suunnan muutoksella on suuri vaikutus monitie-etenemiseen [25], mikä on havaittavissa mittauksista 1-3. Kun tukiasema oli käännettynä kohti älypuhelimta mittauksessa 1, älypuhelimien siirtonopeus oli suurempi kuin mittauksissa 2 ja 3. Kannettavan tietokoneen siirtonopeus puolestaan kasvoi mittauksessa 3, kun tukiasemaa käännettiin oikealle sitä kohti. Kun tukiasema osoitti laitteiden väliin, molempien laitteiden siirtonopeudet laskivat. Liitteessä 4 on kuvaajat mittauksista 1–3. Kuvaajista on havaittavissa, että mittauksessa 2 tiedonsiirtonopeuksien hetkelliset nopeudet vaihtelivat enemmän kuin muissa taulukossa 12 esitetyissä mittauksissa.

6.5 Salauksen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen

Salauksen vaikutus WLAN-verkon tiedonsiirtonopeuteen vaihtelee eri tukiasemien ja salausprotokollien välillä. McCarter on saanut pro gradu -tutkielmassaan 802.11g-standardilla salauksen aiheuttamaksi lisäkuormaksi noin 0,5–4 % salausmenetelmästä riippuen

– WPA2-salauksella lisäkuorma oli noin 1,5 % [26]. Lisäksi kahdessa eri IEEE:n artikkelissa on saatu 802.11n-standardilla WPA2-salauksella noin 2–5 Mb/s hitaampia tiedonsiirtonopeuksia kuin avoimessa verkossa [27; 28]. Tässä tutkielmassa salauksen vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen on testattu 802.11n-standardilla 20 MHz:n kaistanleveydellä ja 802.11ac-standardilla 80 MHz:n kaistanleveydellä. Muilla asetuksilla ei tehty mittauksia, sillä niiden maksimisiirtonopeudet jäivät edellä mainittujen väliin. Mittaukset on tehty D-Linkin tukiasemalla päätelaitteena Lenovon kannettava.

Avoimessa ja WPA2-protokollalla salatussa WLAN-verkossa mitattuja siirtonopeuksia vertaillaan taulukossa 13. Taulukossa on sekä siirtonopeuksien keskiarvot että hetkelliset minimi- ja maksimiarvot. Oikeanpuolimmaisiiin sarakkeisiin on laskettu salauksen vaikutus keskinopeuksiin sekä hetkellisiin maksiminopeuksiin.

Taulukko 13. D-Linkin langattoman reitittimen tiedonsiirtonopeudet (Mb/s) eriteltynä autentikaatiomenetelmän ja TCP-ikkunan koon mukaan.

Autentikaatio	TCP-ikkuna	Nopeus	MIN	MAX	Vaikutus nopeuteen	Vaikutus nopeuteen (MAX)
802.11ac-standardi, taajuusalue 5 GHz, kaistanleveys 80 MHz						
Avoim	1024 KB	308	224	318	8 %	3 %
WPA2	1024 KB	282	215	310		
Avoim	256 KB	296	227	307	11 %	2 %
WPA2	256 KB	264	183	302		
802.11n-standardi, taajuusalue 2,4 GHz, kaistanleveys 20 MHz						
Avoim	1024 KB	46	39.4	52.7	2 %	3 %
WPA2	1024 KB	45	20.9	50.9		
Avoim	256 KB	48	35.8	53.3	7 %	7 %
WPA2	256 KB	45	34.5	49.8		

Taulukosta 13 nähdään, että avoimessa verkossa tiedonsiirtonopeus on suurempi kuin salatussa verkossa. Hetkellisten maksiminopeuksien perusteella laskettu lisäkuorma on lähempänä edellä mainituissa tutkimuksissa [26; 27; 28] saatuja tuloksia, sillä niissä on käytetty lyhyempiä mittausaikoja, joten nopeuden vaihtelut pidemmällä aikavälillä eivät ole vaikuttaneet tuloksiin. Liitteen 5 kuvaajista nähdään myös, että WPA2-salatussa verkossa on hieman enemmän vaihtelua hetkellisissä tiedonsiirtonopeuksissa kuin avoimessa verkossa. Jotta ulkoisten häiriöiden vaikutusta voitaisiin minimoida, mittauksia voisi tehdä myös häiriöttömässä EMC-tilassa.

7 Mittaustulosten analysointi

Mittaustulosten tarkkuuden ja luotettavuuden arvioinnissa on otettava huomioon häiriö- ja virhelähteet. Metropolian WLAN-laboratoriossa keskeisimpiä häiriötekijöitä ovat toiset WLAN-tukiasemat ja päätelaitteet. Radioympäristöä on kartoitettu syksyllä 2014 toteutetussa projektissa Metropolian laboratorioverkon 7signal-järjestelmän avulla [1]. WLAN-laboratorioon sijoitettu 7signalin Sapphire Eye -yksikkö mittasi viereiseen luokkaan sijoitetun WLAN-tukiaseman (D-Linkin DIR-868L) signaali-kohinasuhdetta ja QOS-tekijöitä viikon ajan. Mittausten tuloksena saatiin signaali-kohinasuhteen vaihteluväliksi 45–54 dB. Testattavan tukiaseman signaalitaso Eye-yksiköllä oli keskimäärin –45 dBm. Vaikka Eye-yksiköllä signaalitason mittausravot ovat noin 7–15 dB korkeampia kuin tavallisilla WLAN-vastaanottimilla, tulokset ovat tämänkin huomioon ottaen erittäin hyvät [29]. Tietoverkkoprojektissa tehtiin myös mittauksia häiriöiltä eristetyssä EMC-tilassa. Kun EMC-tilan siirtonopeuksia verrattiin WLAN-laboratoriossa saatuihin siirtonopeuksiin, radioympäristön häiriöiden vaikutukseksi voitiin arvioida noin 8–16 %. [1.]

Satunnaisia häiriölähteitä pyrittiin minimoimaan tekemällä kolme viiden minuutin mitausta testiä. Testien suorittamiseen liittyviä virhelähteitä ovat esimerkiksi tukiaseman ja päätelaitteen välisen etäisyyden pienet vaihtelut mittausten välillä sekä tilassa mittausten aikana liikkuneet henkilöt. Joissakin mittauksissa TCP-ikkunan koko on myös ollut virheellisesti 254 kilotavua 256 kilotavun sijaan, joskaan käytännössä sillä ei liene kovin suurta vaikutusta mittaustuloksiin. Testien suorittamisessa ei myöskään oltu täysin johdonmukaisia, kun Ciscon ac-tukiasemalla määriteltiin kanava staattisesti ja muutoin käytettiin dynaamista määrittelyä. Myös WPA2-protokollan käyttäminen DIR-868L:llä ja avoimen autentikaation käyttäminen kontrolleripohjaisilla tukiasemilla on vaikuttanut jonkin verran mittaustulosten vertailukelpoisuuteen (ks. luku 6.5).

Insinööriyöprojektissa oli käytössä 802.11ac-luonnosstandardiin perustuvia laitteita, jotka oli valmistettu ennen Wi-Fi Alliancen 802.11ac-sertifiointiohjelman julkistamista. Projektin aikana ei kuitenkaan havaittu merkittäviä yhteensopivuusongelmia, sillä laitteita oli testattu aikaisemmassa tietoverkkoprojektissa; TeleWellin USB-adapteri testattiin toimivaksi, kun taas D-Linkin 802.11ac-luonnosstandardiin perustuva USB-adapteri DWA-182 ei toiminut Ciscon tukiasemalla 5 GHz:n taajuusalueella. Toisaalta myös TeleWellin USB-adapterilla oli havaittavissa toiminnan epävakaisuutta 802.11ac-standardilla 5 GHz:n alueella, kun käytössä oli 20 MHz:n kaistanleveys (ks. kuvat 4–6, liitteet 1–3).

Epävakaus saattaa olla seurausta esimerkiksi jostakin TeleWellin USB-adapterille spesifistä suorituskyykyongelmasta, mutta on myös mahdollista, että näissä mittauksissa on vain sattunut olemaan enemmän häiriöitä.

Joitakin mittauksia olisi syytä myös suorittaa uudelleen. Esimerkiksi 802.11n-standardin mittauksissa määriteltiin tukiasemalta tavoitekaistanleveys ja taajuusalue, mutta ei MCS-asetusta. Myöhemmin huomattiin, että D-Linkin reititin käyttää 802.11ac-standardin MCS-arvoja 8 ja 9, vaikka ainoastaan 802.11n olisikin sallittuna – näin toimii mahdollisesti myös Ciscon ac-tukiasema. Luvun 6.2 kuvan 5 mittauksissa (2a) ja (3a) onkin luultavasti todellisuudessa ollut käytössä QAM-256-modulaatio. Tästä syystä kannettavan verkkokortilla tehty mittaus (3b) suoritettiin uudelleen 802.11n-standardilla siten, että D-Linkin reitittimeltä valittiin staattisesti MCS-indeksi 7. USB-adapterilla suoritettuja testejä (2a) ja (3a) ei kuitenkaan uusittu, sillä mittauksissa käytettyjä laitteita ei ollut enää saatavilla.

Kuten edeltä käy ilmi, WLAN-verkkojen suorituskyykyyn vaikuttaa varsin suuri joukko erilaisia tekijöitä. Näiden vaikutusten eristäminen on käytännön olosuhteissa haastavaa. Esimerkiksi salauksen vaikutusta tutkittaessa on otettava huomioon, että ympäristön häiriöt saattavat vaikuttaa tiedonsiirtonopeuteen enemmän. Tästä huolimatta mittaustulosten voidaan todeta olevan riittävän tarkkoja, jotta niistä saa hyvän yleiskuvan 802.11n/ac-standardien suorituskyyvystä.

8 Pohdintaa

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia 802.11n- ja 802.11ac-standardien suorituskyykyä. Projektin aikana rakennettiin kaksi testiverkkoa ja testattiin kolmen eri tukiaseman suorituskyykyä. Tukiasemia testattiin tekemällä tiedonsiirtonopeusmittauksia eri kaistanleveyksillä, taajuusalueilla ja 802.11-standardiversioilla. Iperfillä otettiin käyttöön joko TCP- tai UDP-protokolla ja muutettiin TCP-ikkunan kokoa tai UDP-tavoitenopeutta tarkoituksena tutkia, miten ne vaikuttavat tiedonsiirtonopeuteen. Lisäksi testattiin langattoman reitittimen dual-band-ominaisuuden toimivuutta ja mitattiin salauksen vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen.

Mittauksien perusteella voidaan todeta, että 802.11ac-standardi oli kaiken kaikkiaan nopeampi kuin 802.11n: kaikista tehdyistä mittauksista viisi nopeinta oli tehty ac-standardilla. Toisaalta tukiasemien väliset erot suorituskäytössä voivat olla varsin suuria ja myös päätelaitteen liityntämenetelmällä on suuri vaikutus tiedonsiirtonopeuteen. Langattomalla reitittimellä testattu dual-band-ominaisuus puolestaan vaikuttaa lupaavalta keinolta lisätä kapasiteettia verkkoihin, kun sekä 2,4 GHz:n että 5 GHz:n taajuuskaistoja voidaan hyödyntää samanaikaisesti. Dual-band-suorituskykyä olisikin syytä testata myös suuremmalla kuormituksella, jotta voitaisiin arvioida, paljonko sen avulla pystyy lisäämään kapasiteettia usean käyttäjän WLAN-verkkoon. Lopuksi 802.11n/ac-standardeilla WPA2-salauksen aiheuttaman lisäkuorman havaittiin olevan samassa linjassa aikaisempien 802.11n/a/g-standardiversioilla tehtyjen tutkimusten kanssa – noin 2–3 %. Arviota voisi kuitenkin vielä tarkentaa esimerkiksi tekemällä lisätutkimuksia häiriöttömässä ympäristössä.

Kaiken kaikkiaan insinööritö on ollut monipuolinen oppimisprojekti, jonka aikana sen tekijä on paitsi saanut paljon tietoa WLAN-verkoista, myös oppinut uutta mittausten suunnittelusta, toteuttamisesta ja datan käsittelystä. Projektin aikana tehtiin yli 150 viiden minuutin Iperf-mittausta, joista kertyi suuri määrä mittaustietoa. Data vietiin Excelliin, missä se käsiteltiin kuvaajiksi ja siitä laskettiin tarvittavat arvot Visual Basic -makrojen avulla, sillä käsin tehtynä työ olisi vienyt todella paljon aikaa. Mittausten suorittaminen onnistui pääsääntöisesti ongelmitta – toisaalta matkan varrelle mahtui muutama mutkakin. Ciscon Catalyst 3850 -kytkin hajosi yllättäen projektin puolivälissä ja jouduttiin vaihtamaan uuteen. Kytkin vaati myös käyttöjärjestelmäpäivityksen ennen kuin sillä pystyi hallinnoimaan 802.11ac-standardin tukiasemia eikä sen web-käyttöliittymä ollut yhteensopiva laboratorioluokan Windows-versioiden kanssa. Projektin parissa työskennellessä ja etenkin mittaustulosten käsittelyn yhteydessä tuli konkreettisesti ilmi, kuinka WLAN-verkon tiedonsiirtonopeuteen vaikuttaa useita tekijöitä, joiden vaikutuksen kontrolloiminen ei ole yksinkertaista. Tutkimusta voisikin jatkaa perehtymällä syvällisemmin jonkin yksittäisen tekijän, kuten esimerkiksi salauksen, etäisyyden tai kuormituksen vaikutuksen mittaamiseen. Mielenkiintoisia jatkotutkimuskohteita ovatkin esimerkiksi kuormitustestaukset ja tiedonsiirtonopeusmittaukset toisen aallon 802.11ac-laitteilla, lisäkuormituksen tarkempi tutkiminen (sekä salauksen vaikutus lisäkuormaan) ja MU-MIMO-ominaisuuden testaaminen.

Lähteet

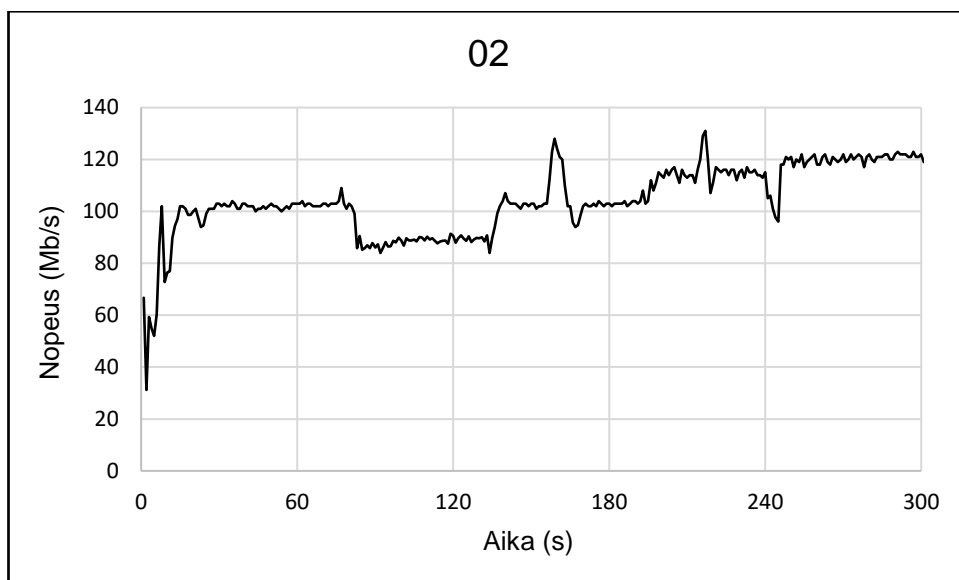
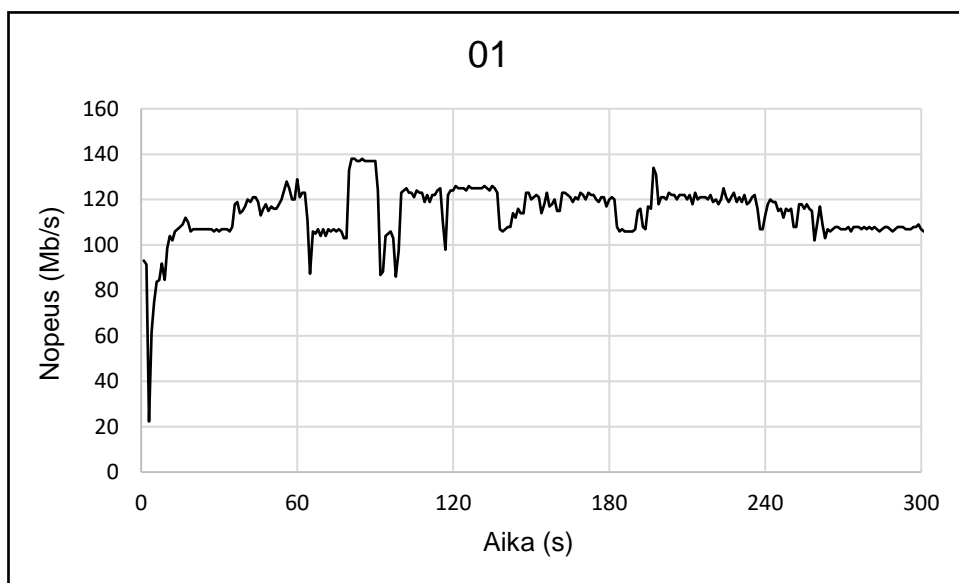
- 1 Kettunen, S., Hakola, I. & Kuusniemi, J. 2014. Tiedonsiirtonopeus WLAN-verkoissa. Tietoverkkoprojektio-pintokokonaisuuden loppuraportti.
- 2 Wi-Fi Alliance. Verkkosivusto. <<http://www.wi-fi.org/>>. Luettu 9.11.2016.
- 3 IEEE timelines. Verkkodokumentti. IEEE. <http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm>. Päivitetty 27.3.2017. Luettu 16.4.2017.
- 4 Bellalta, Boris. 2016. IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANS. IEEE Wireless Communications. 2.3.2016, osa/vuosik. 23, nro 1, s. 38 - 46.
- 5 Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper. 2017. Cisco VNI. Verkkodokumentti. Päivitetty 7.2.2017. Luettu 16.4.2017.
- 6 The Zettabyte Era — Trends and Analysis – Cisco. 2016. Cisco VNI. Verkkodokumentti. Päivitetty 2.6.2016. Luettu 1.12.2017.
- 7 Machowinski, Matthias. 2016. RESEARCH NOTE - 802.11ac Wave 2 Is Now Making Up 10 Percent of Access Point Shipments. Verkkodokumentti. <<https://technology.ihc.com/587182/research-note-80211ac-wave-2-is-now-making-up-10-percent-of-access-point-shipments>>. Päivitetty 28.12.2016. Luettu 15.4.2017.
- 8 Gast, Matthew. 2005. 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, 2nd Edition. O'Reilly Media.
- 9 Gast, Matthew. 2013. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media.
- 10 Benton, Kevin. 2010. The Evolution of 802.11 Wireless Security. Verkkodokumentti. <http://homes.soic.indiana.edu/ktbenton/research/benton_wireless.pdf>. Luettu 16.4.2017.
- 11 IEEE Std 802.11™-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012). 2016. IEEE Computer Society.
- 12 Jaakohuhta, Hannu. 2011. Tietotekniikan sanakirja. Bookwell Oy, Vaajakoski: Readme.fi.
- 13 Gast, Matthew. 2012. 802.11n: A Survival Guide. O'Reilly Media.
- 14 Wi-Fi CERTIFIED™ ac brings new advances in Wi-Fi® performance. 2016. Verkkodokumentti. Wi-Fi Alliance. <<http://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi>>.

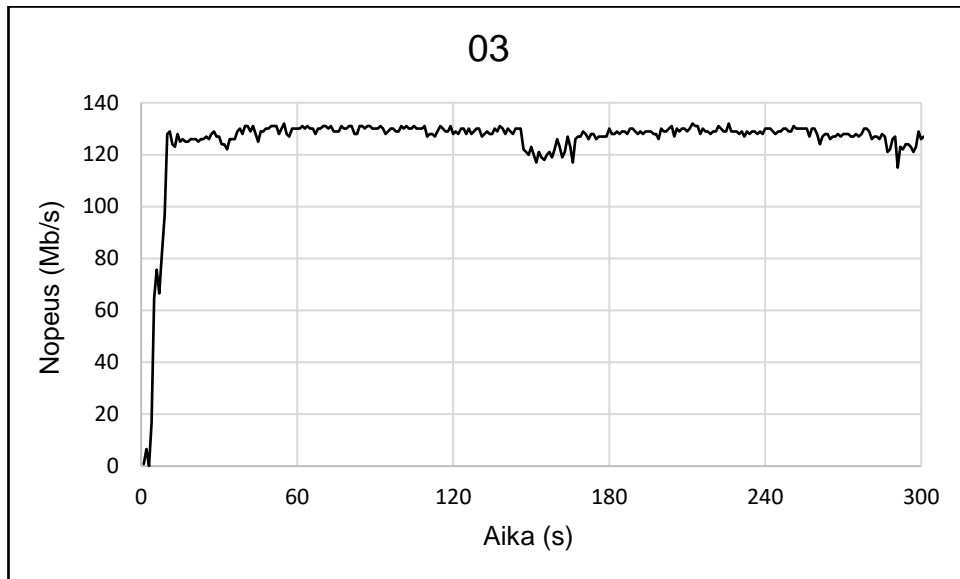
- certified-ac-brings-new-advances-in-wi-fi-performance>. Päivitetty 29.6.2016. Luettu 9.11.2016.
- 15 Määräys 15 AK/2016 M luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistajuuksista ja käytöstä. 2016. Suomen Viestintävirasto.
 - 16 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper. 2015. Verkko-dokumentti. Cisco. <http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html>. Päivitetty 16.11.2015. Luettu 16.4.2017.
 - 17 Szigeti, Tim & Hattingh, Christina. 2004. Quality of Service Design Overview. 17.12.2004. Verkkodokumentti. Cisco Press. <<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=357102>>. Luettu 16.4.2017.
 - 18 Site Survey Guidelines for WLAN Deployment. 2013. Verkkodokumentti. Cisco. <<http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/116057-site-survey-guidelines-wlan-00.html>>. Päivitetty 10.4.2013. Luettu 16.4.2017.
 - 19 iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP. 2016. Verkkosivusto. <<https://iperf.fr/>>. Luettu 22.10.2016.
 - 20 iperf/README.md. 2016. Verkkodokumentti. Esnet. <<https://github.com/esnet/iperf>>. Luettu 9.11.2016.
 - 21 Chapter: 802.11ac Support on WLC5760 and Catalyst 3850. 2015. Verkkodokumentti. Cisco. <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/technology/5760_deploy/CT5760_Controller_Deployment_Guide/802_11ac_support_on_WLC5760_and_Catalyst_3850.html>. Päivitetty 21.7.2015. Luettu 27.4.2016.
 - 22 Davies, Joseph. 2007. The Cable Guy TCP Receive Window Auto-Tuning. Verkkodokumentti. Microsoft TechNet. <<https://technet.microsoft.com/en-us/library/2007.01.cableguy.aspx>>. Luettu 14.4.2017.
 - 23 Kurose, James F. & Ross, Keith W. 2012. Computer Networking: A Top-Down Approach. Pearson Education Limited.
 - 24 Alakoca, H., Karacay, M. & Kurt, G. K. 2015. Performance of TCP over 802.11ac based WLANs via Testbed Measurements. 2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Lisätty IEEE Xploreen 19.4.2016.
 - 25 Sendra, S., Fernandez, P., Turro, C. & Lloret, J. 2010. IEEE 802.11a/b/g/n Indoor Coverage and Performance Comparison. 2010 6th International Conference on Wireless and Mobile Communications. Lisätty IEEE Xploreen 11.11.2010.

- 26 McCarter, Harold Lars. 2006. Analyzing Wireless LAN Security Overhead. Master's Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- 27 Adnan, A., H., Abdirazak, M., Sadi, A. B. M. S., Anam, T., Khan, S. Z., Rahman, M. M. & Omar, M. M. 2015. A comparative study of WLAN security protocols: WPA, WPA2. 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). Lisätty IEEE Xploreen 11.7.2015.
- 28 Li, P., Kolahi S. S., Safdari, M. & Argawe M. 2011. Effect of WPA2 Security on IEEE 802.11n Bandwidth and Round Trip Time in Peer-Peer Wireless Local Area Networks. 2011 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Lisätty IEEE Xploreen 5.5.2011.
- 29 7signal mittausraportti. 2014. 7signal.

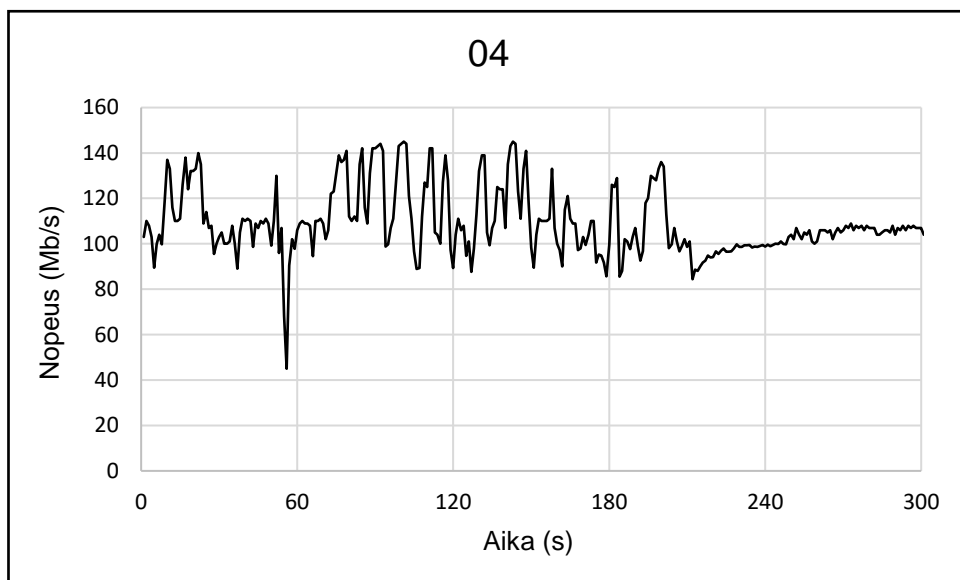
D-Linkin tukiasemalla DIR-868L tehdyt tiedonsiirtonopeusmittaukset

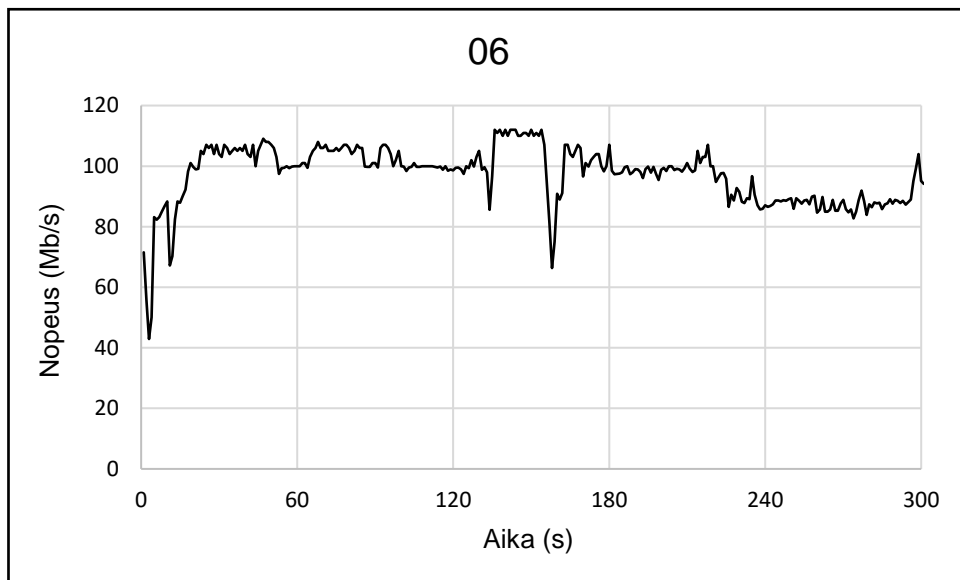
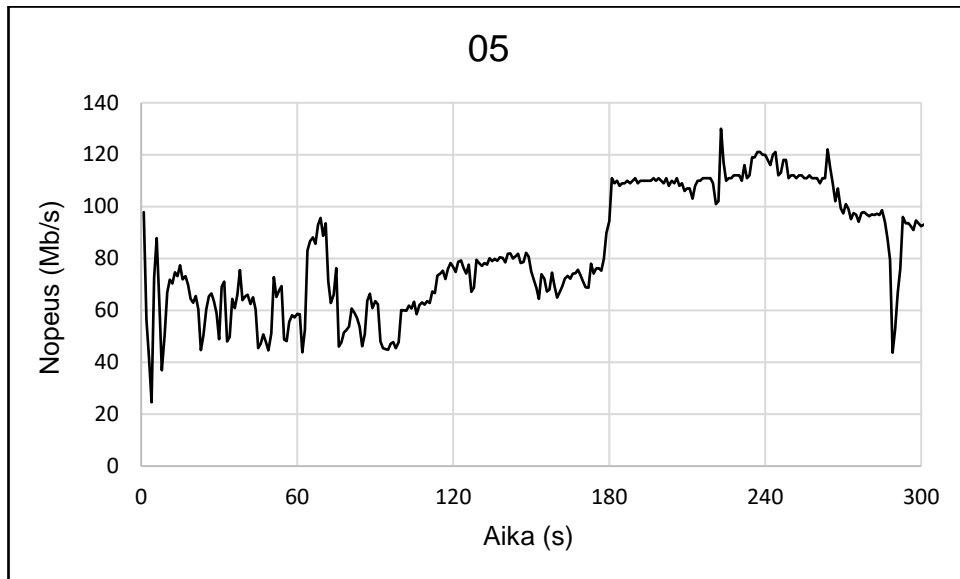
Pvm.	26.4.2016
Standardi	n
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	254 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri



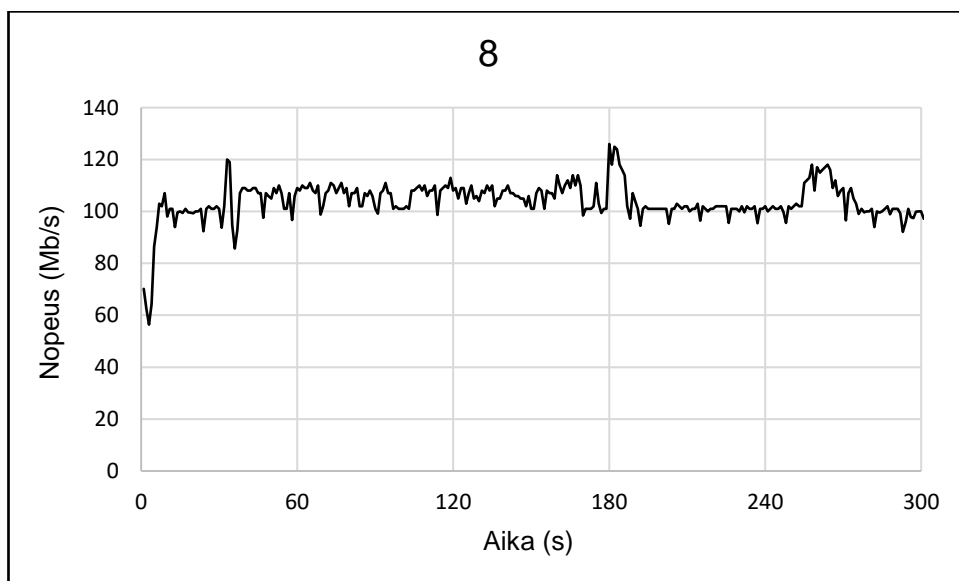
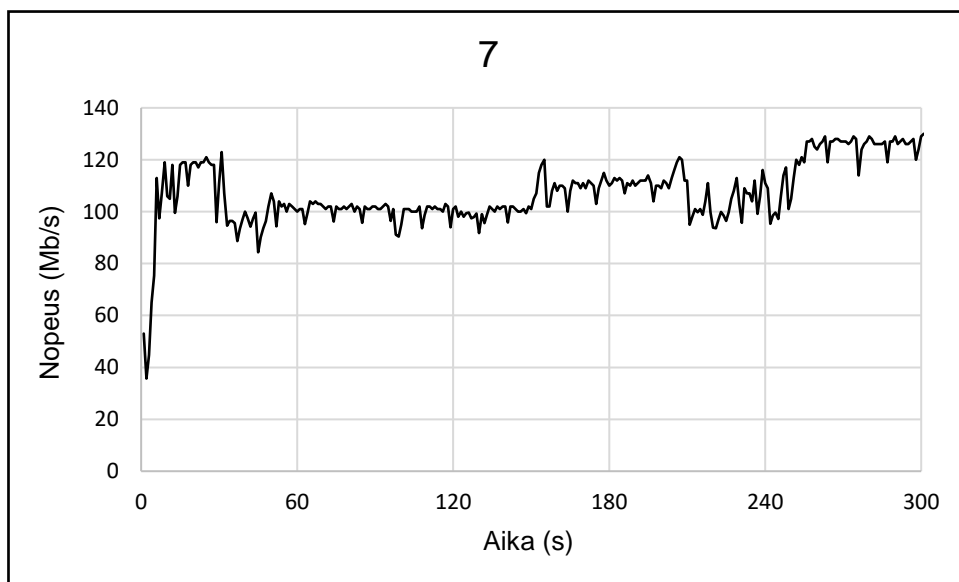


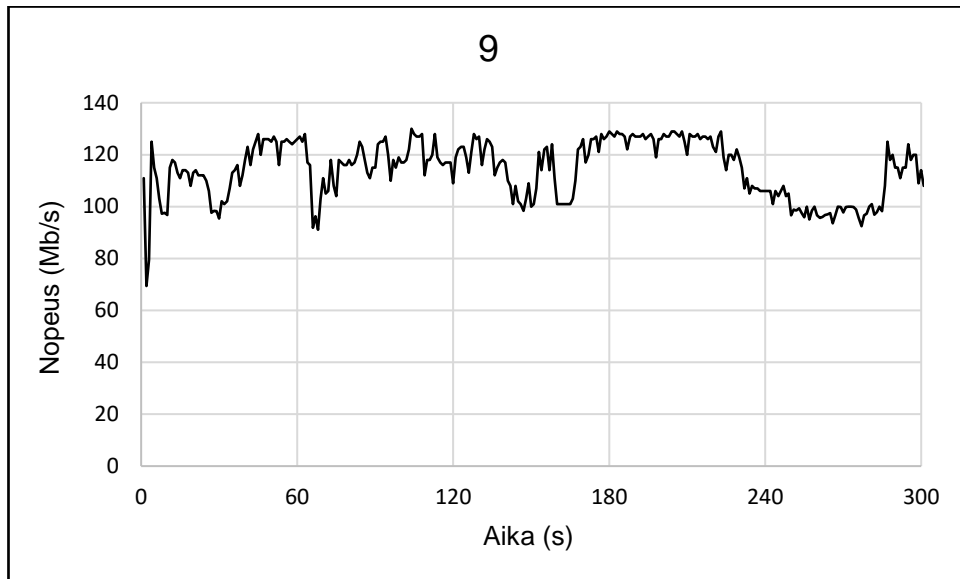
Pvm.	26.4.2016
Standardi	n
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri



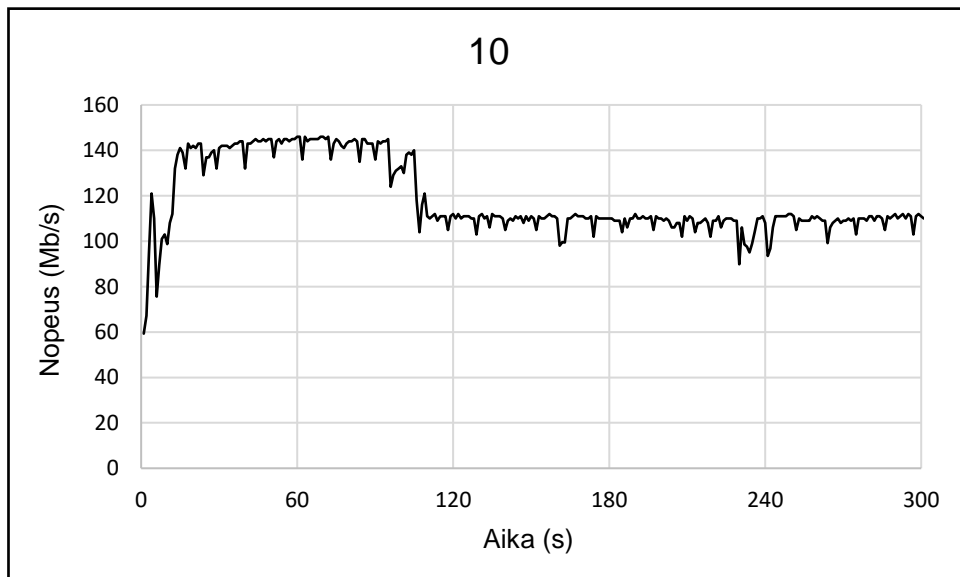


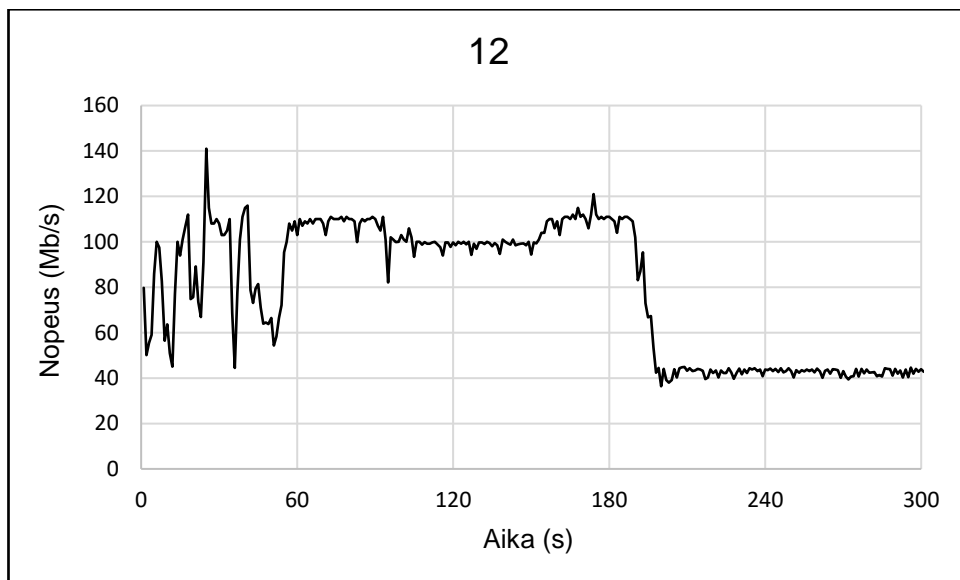
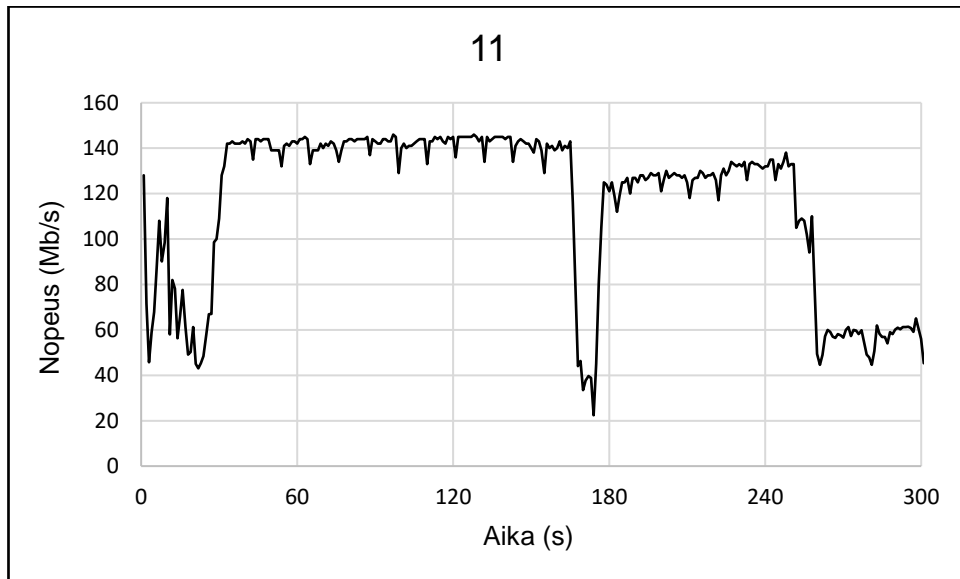
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	256 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri





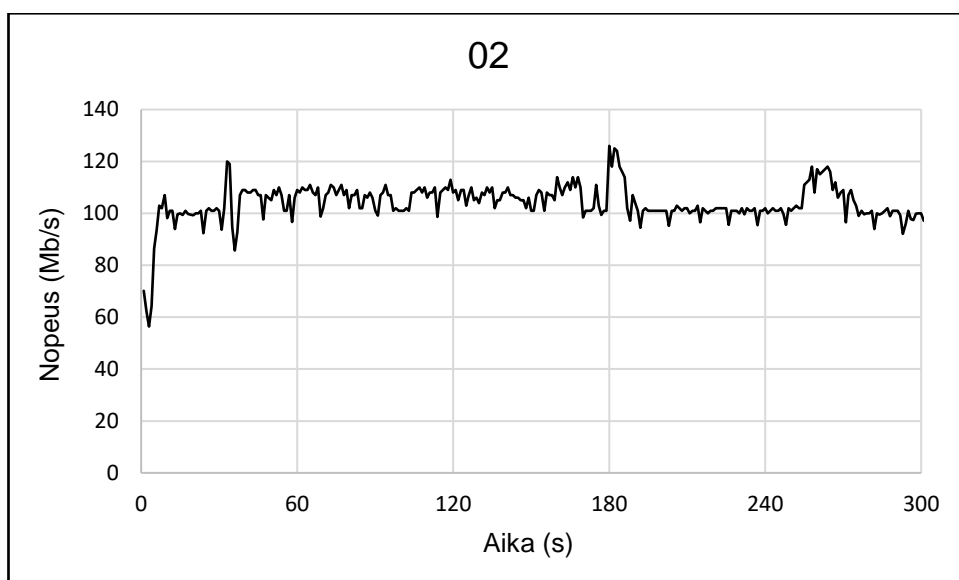
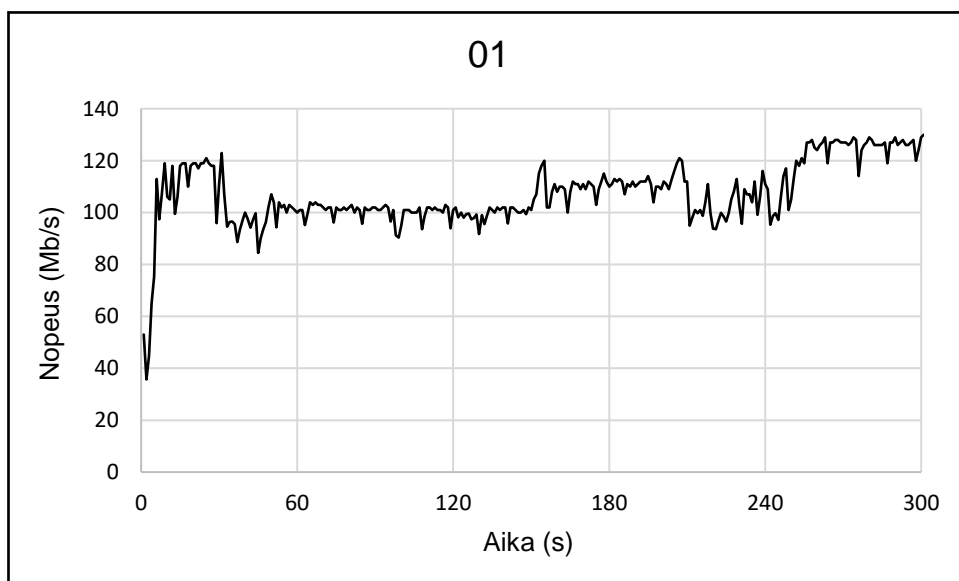
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri

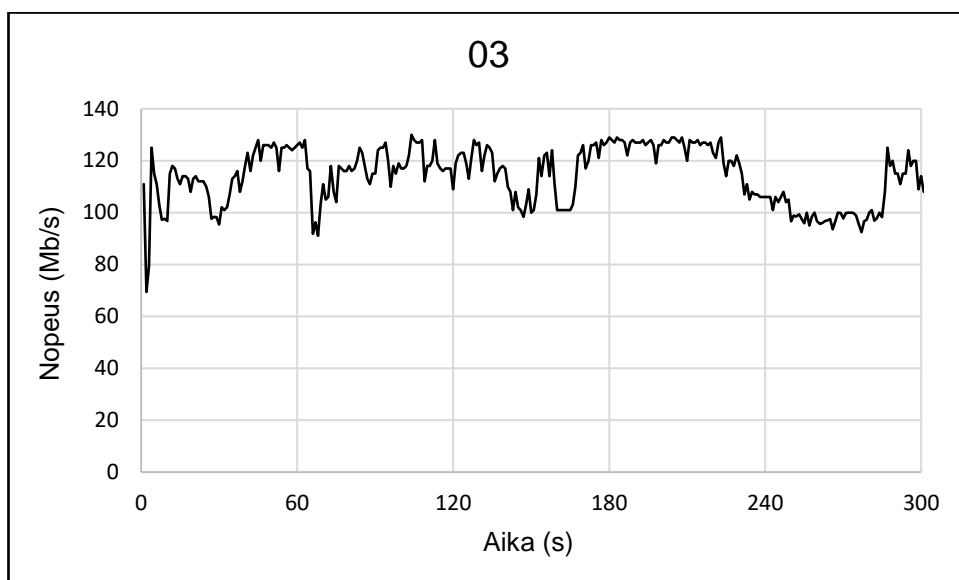




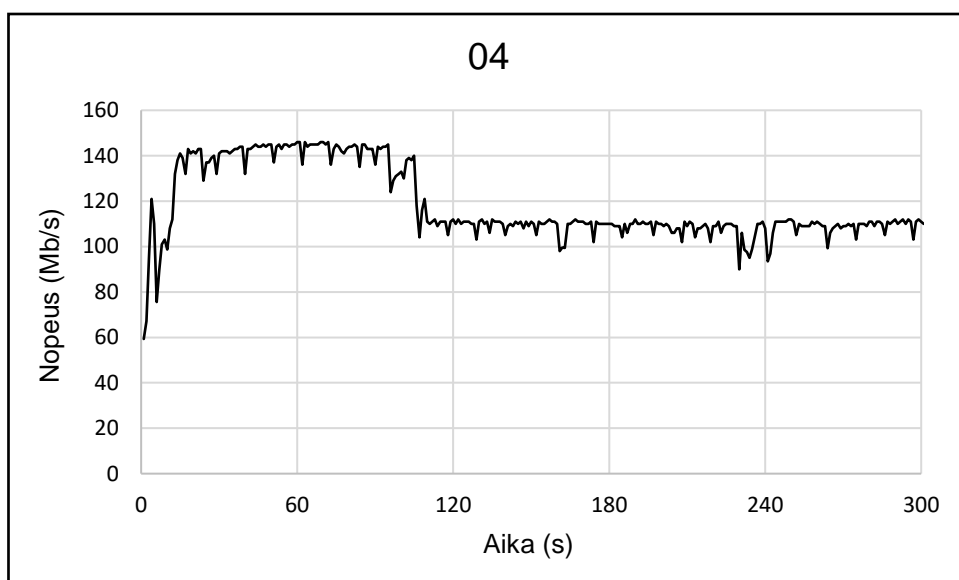
Ciscon tukiasemalla AIR-CAP3602I tehdyt tiedonsiirtonopeusmittaukset

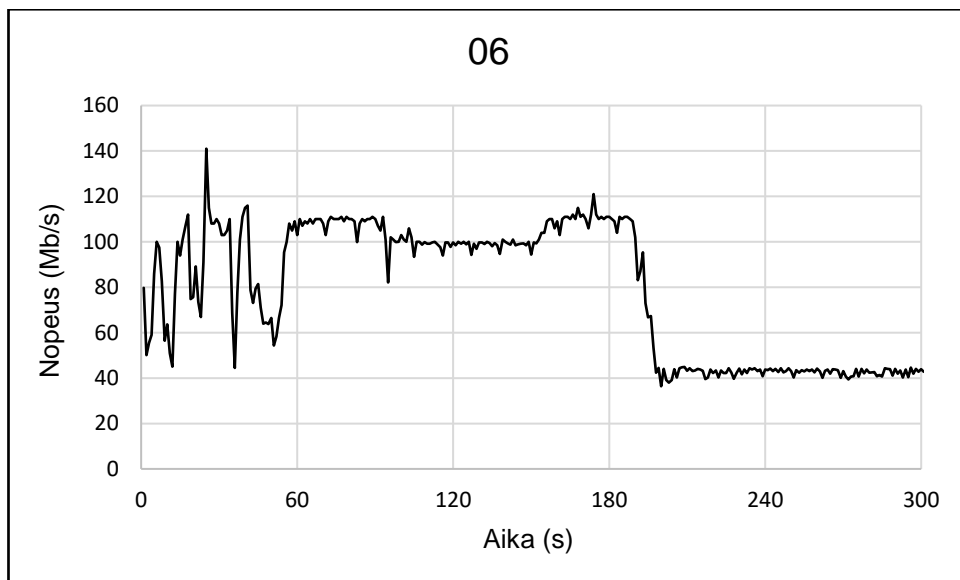
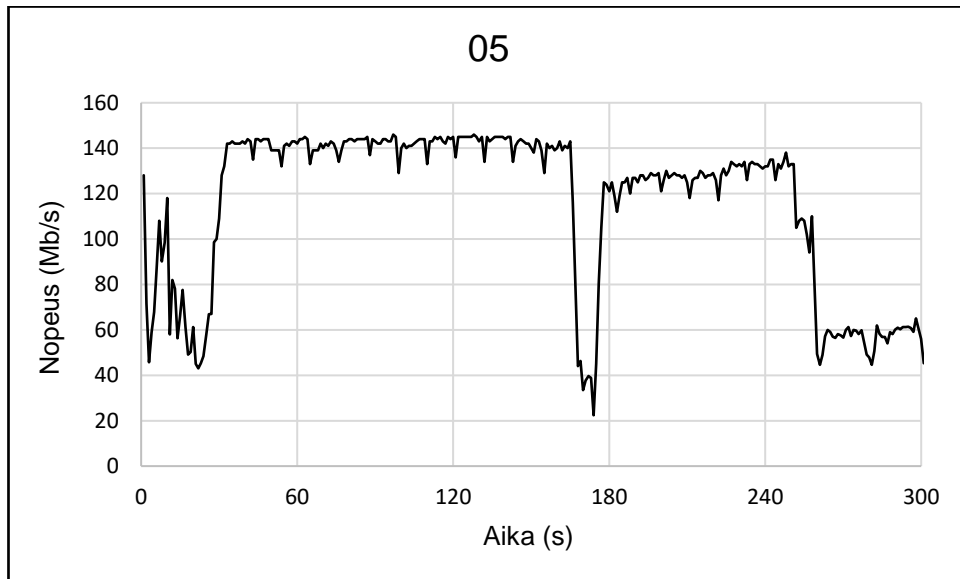
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	256 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri



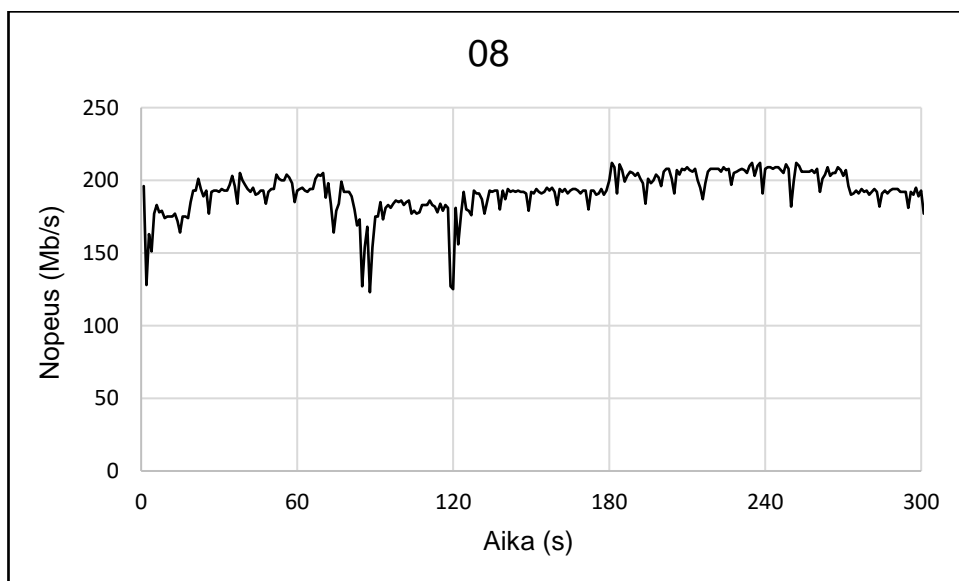
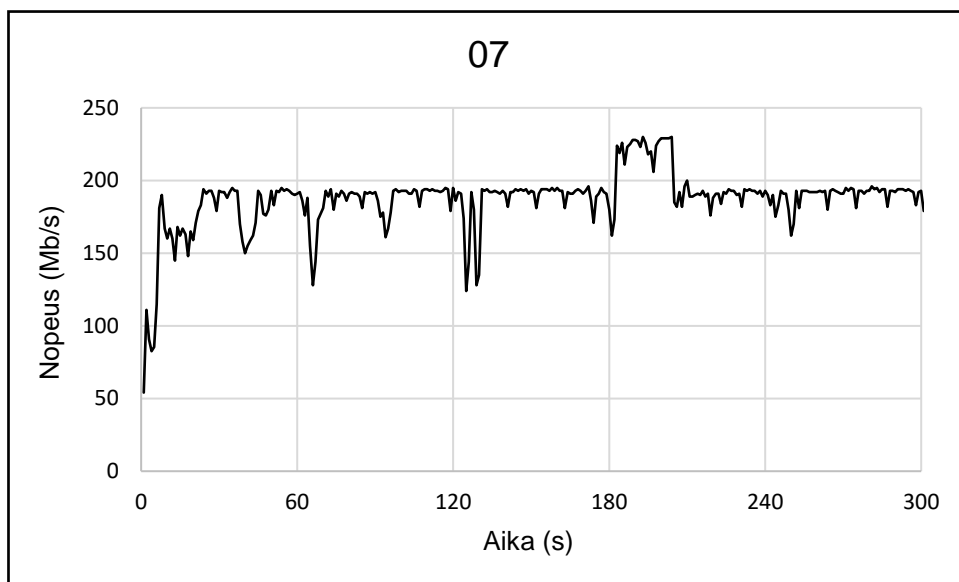


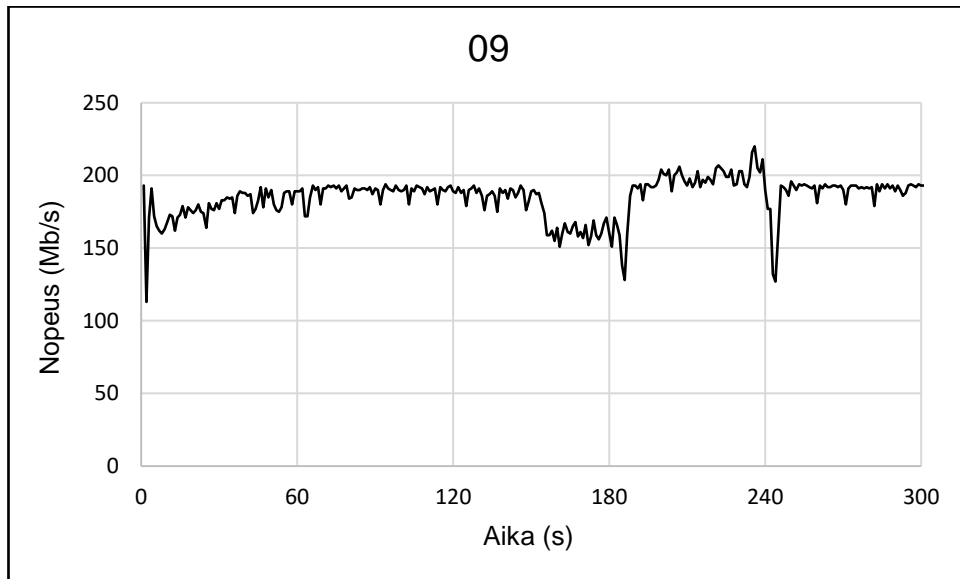
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri



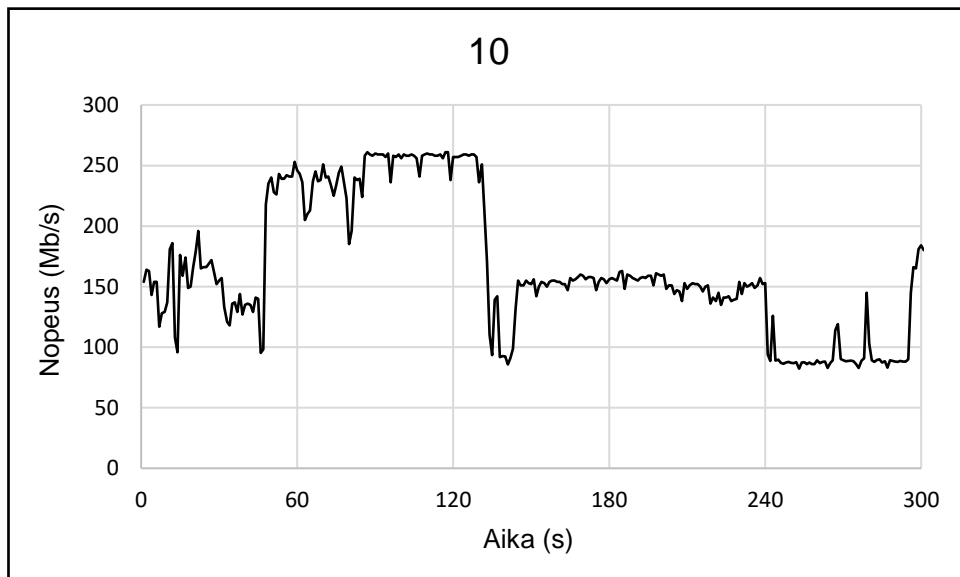


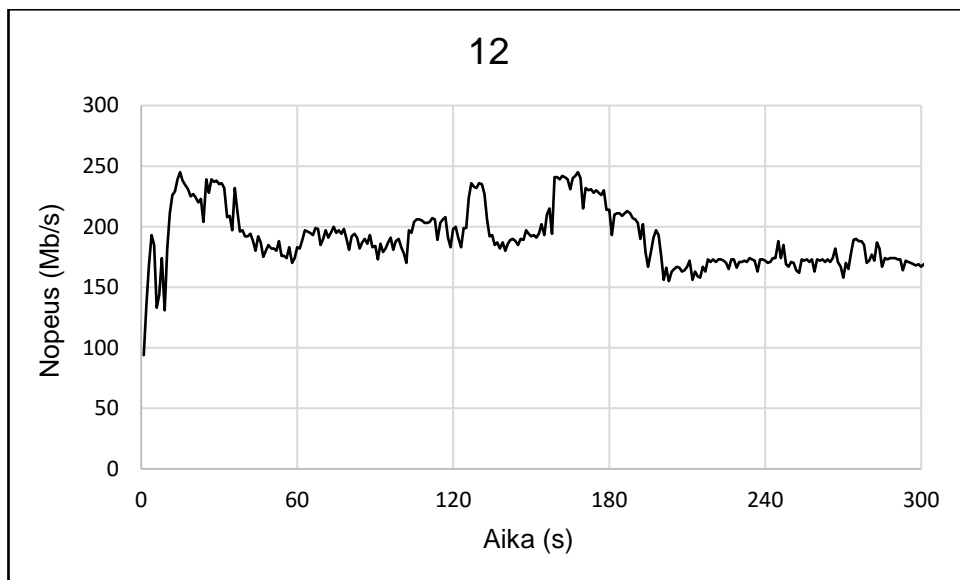
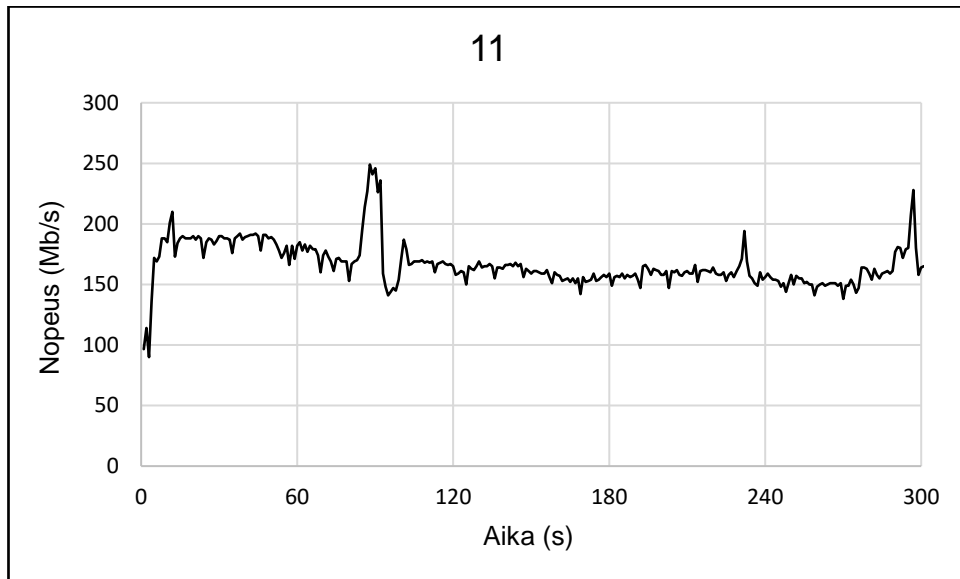
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	40 MHz
TCP-ikkunan koko	256 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri



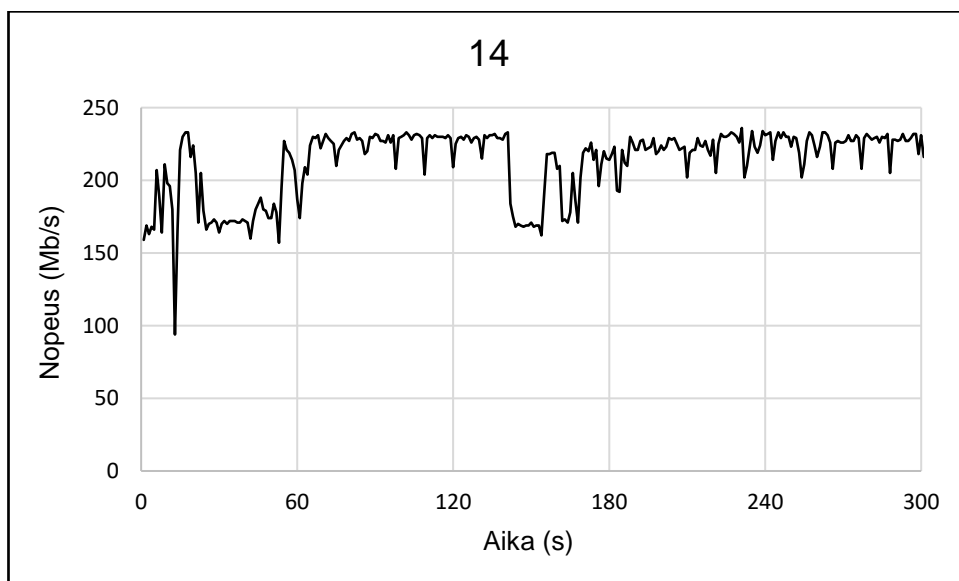
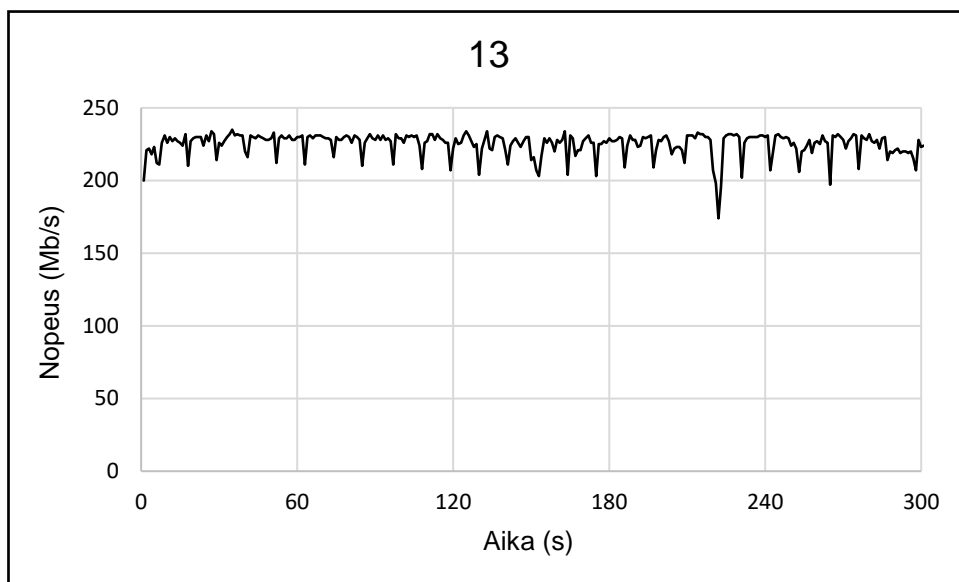


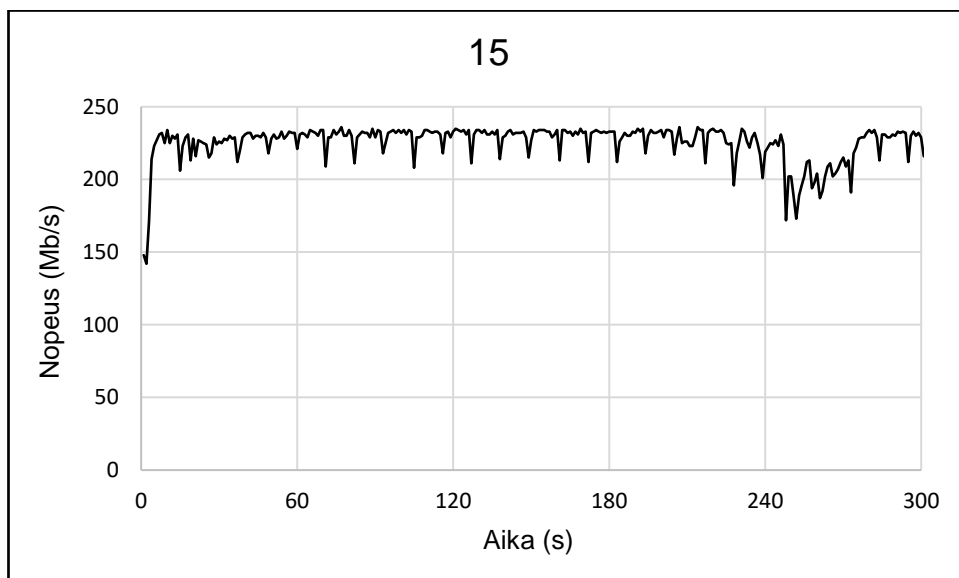
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	40 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri



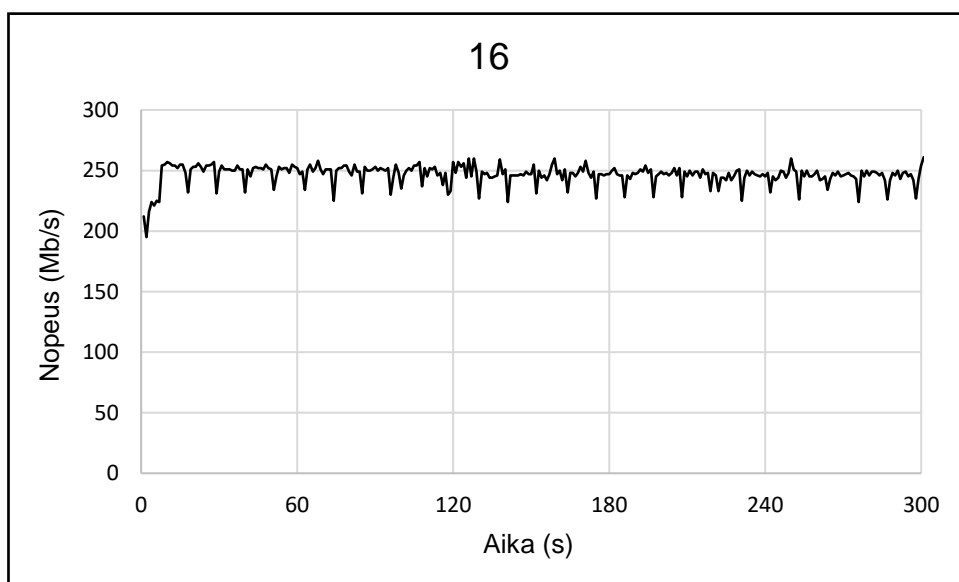


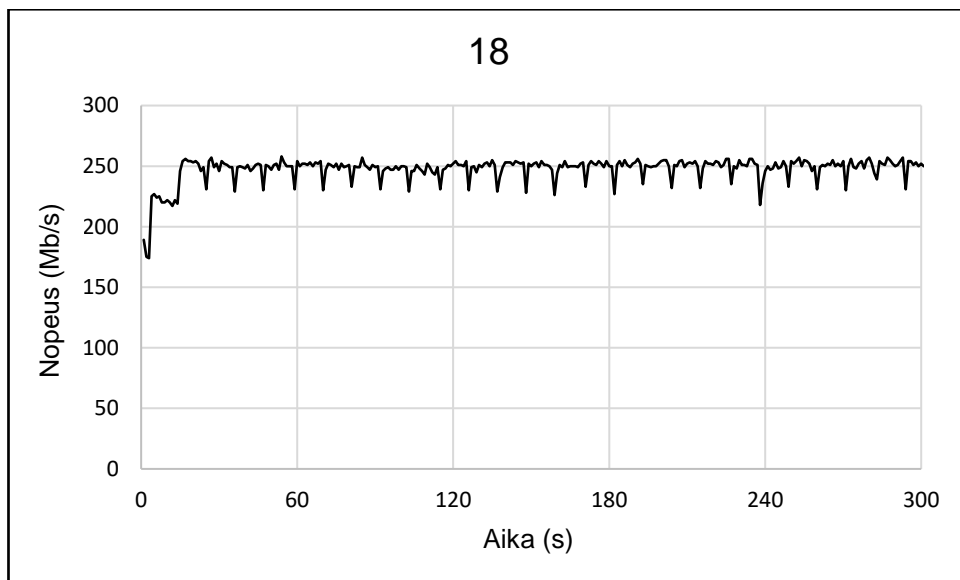
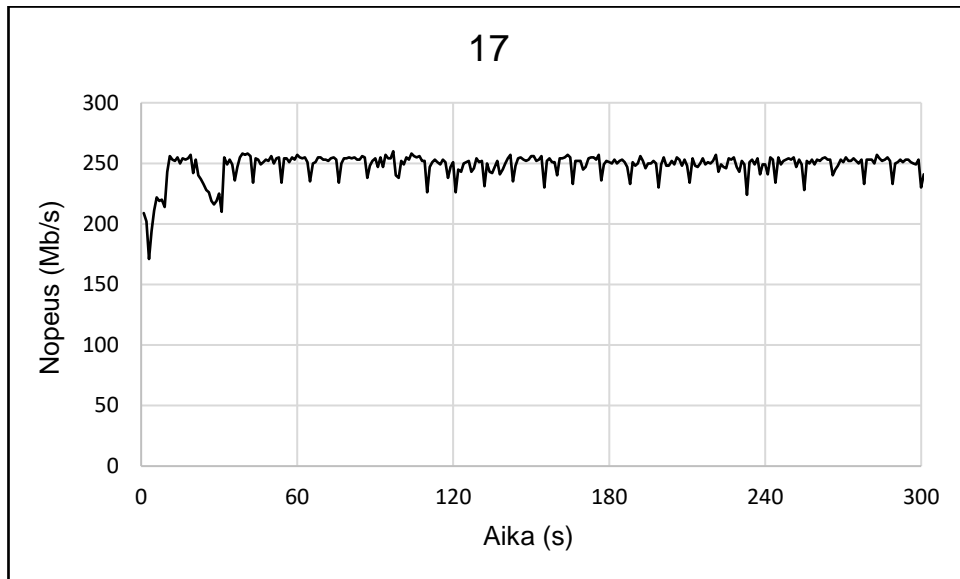
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	80 MHz
TCP-ikkunan koko	256 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri





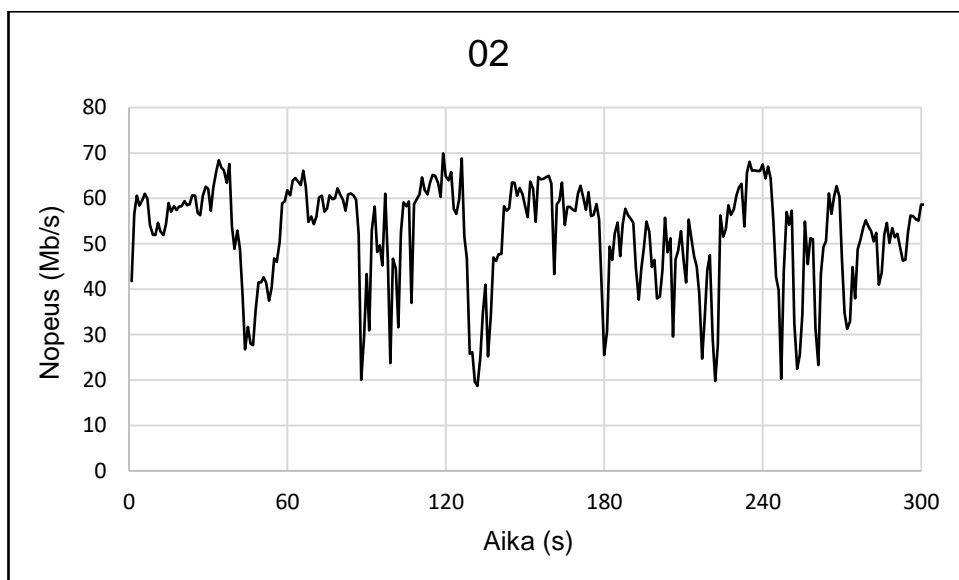
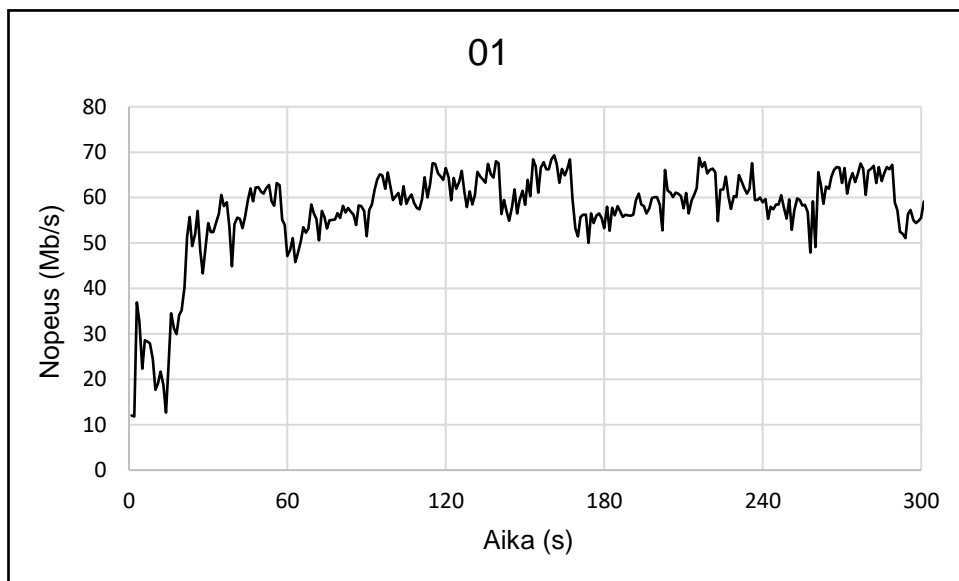
Pvm.	11.5.2016
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	80 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
PC:n WLAN-liityntä	TeleWell adapteri

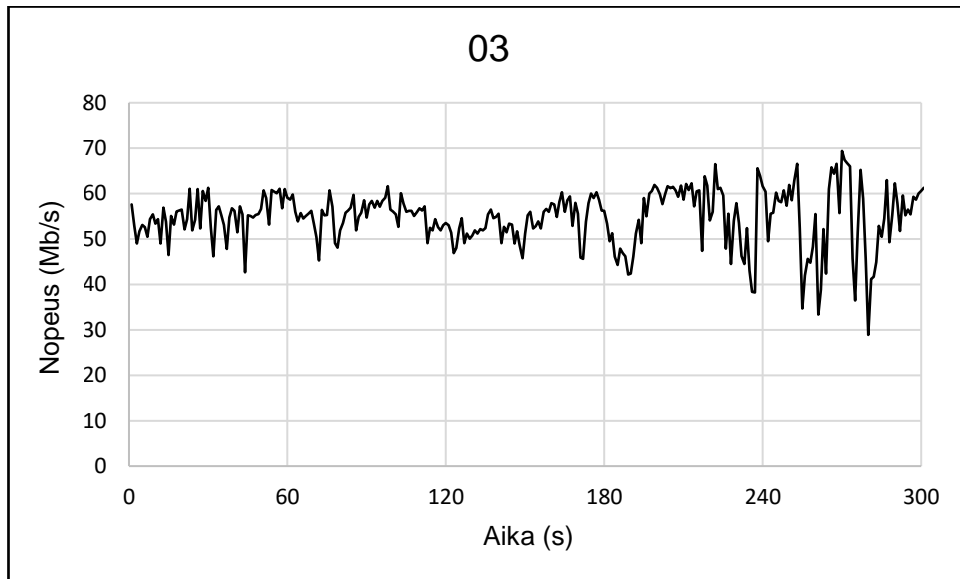


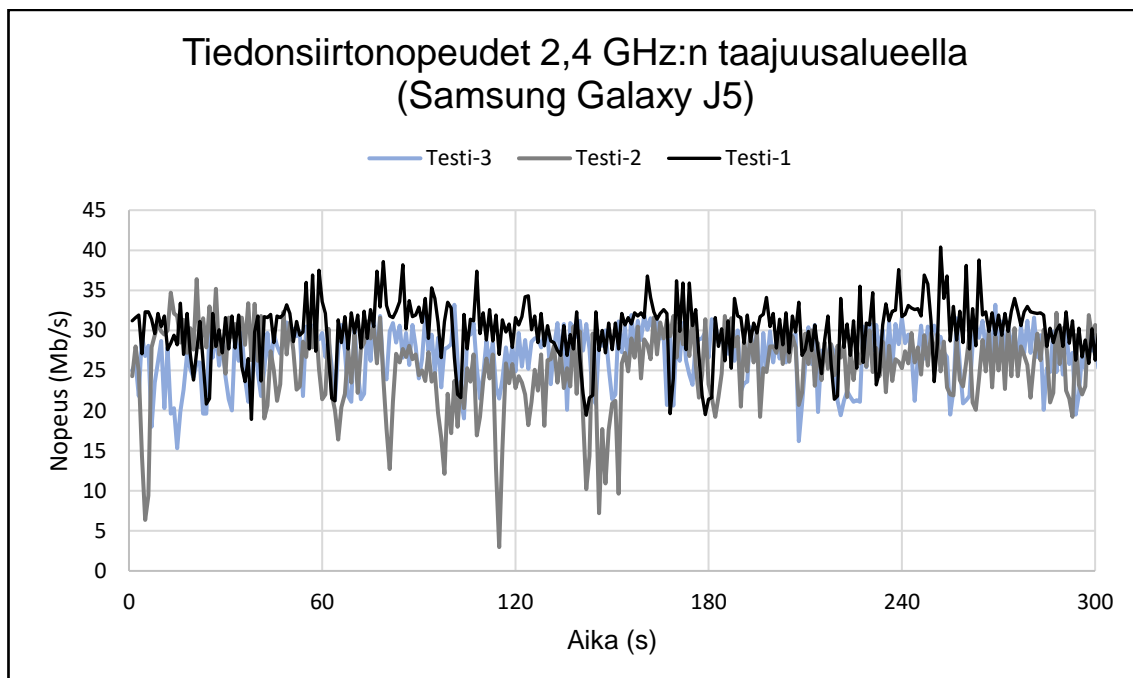
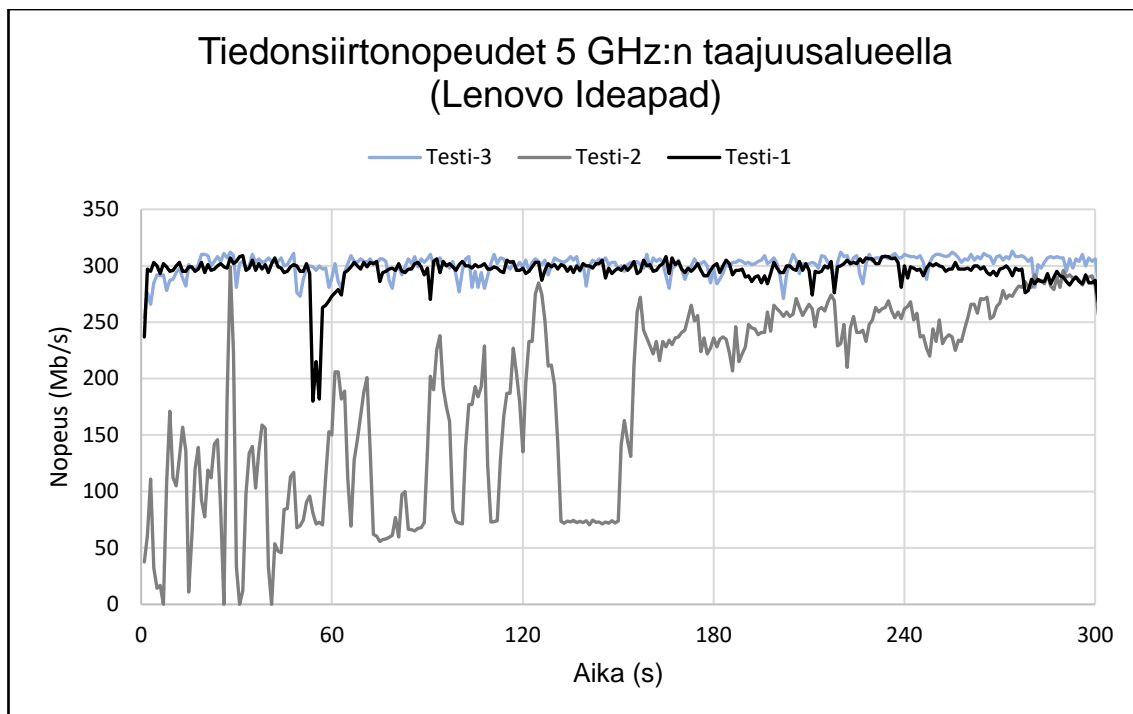


Ciscon tukiasemalla AIR-CAP3502I tehdyt tiedonsiirtonopeusmittaukset

Pvm.	26.4.2016
Standardi	n
Taajuusalue	2,4 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
PC:n WLAN-liityntä	N-verkkokortti

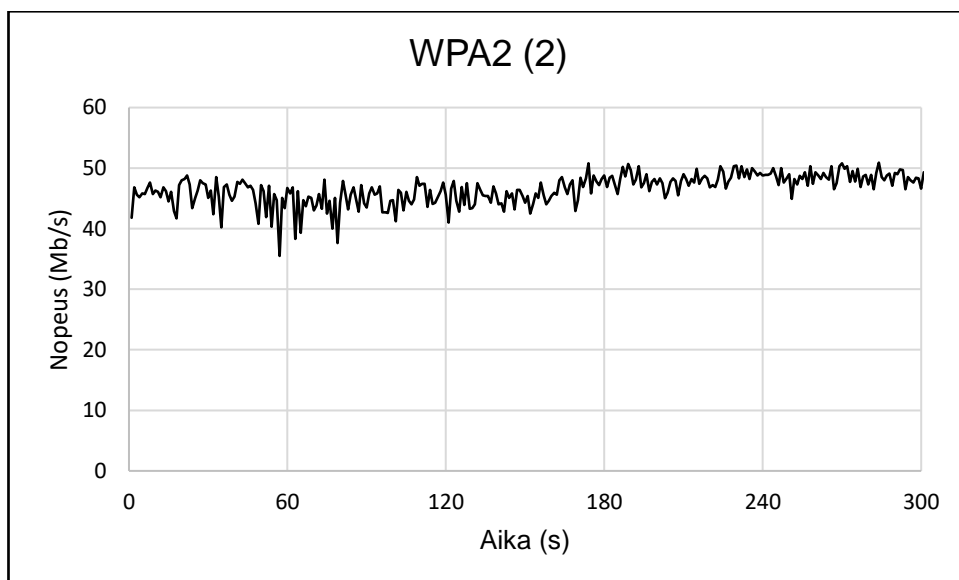
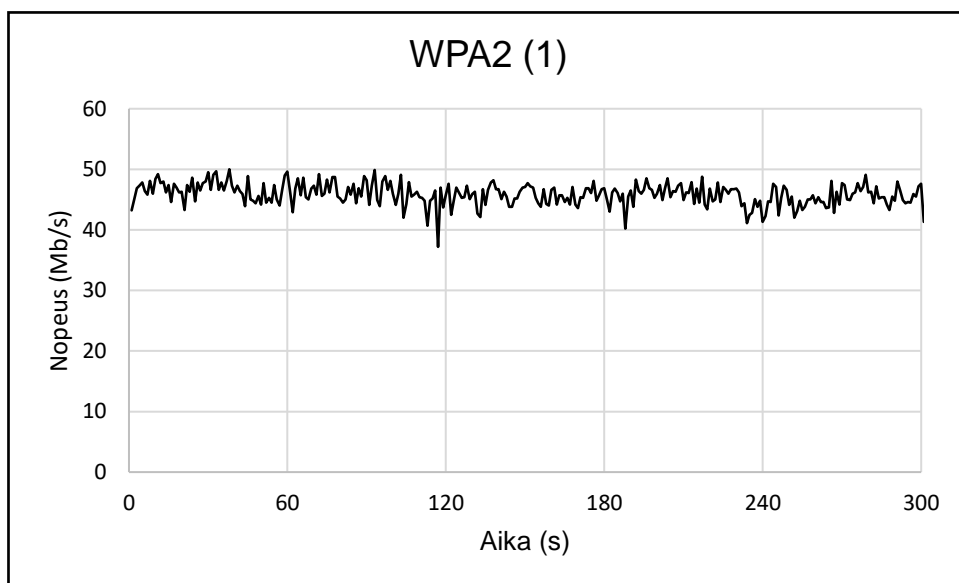


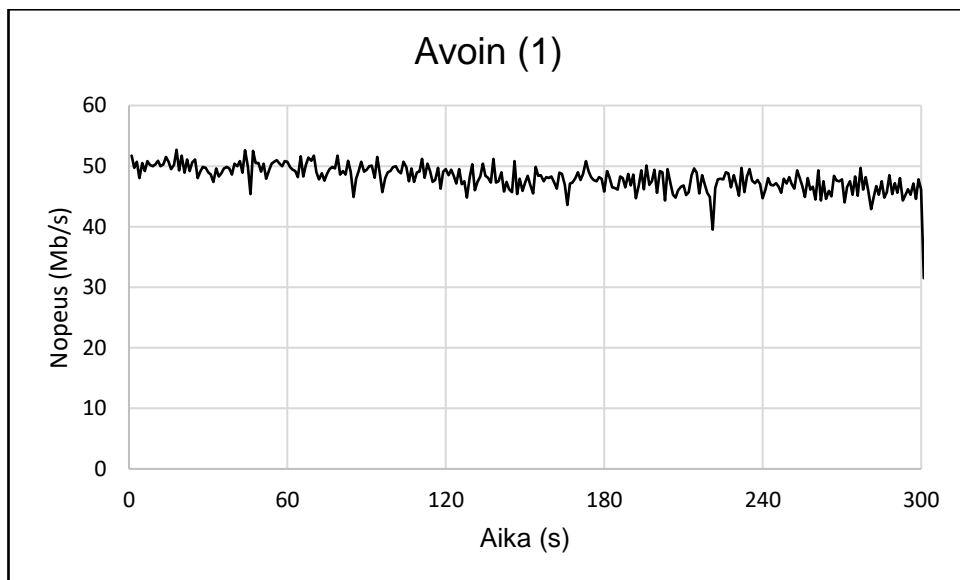
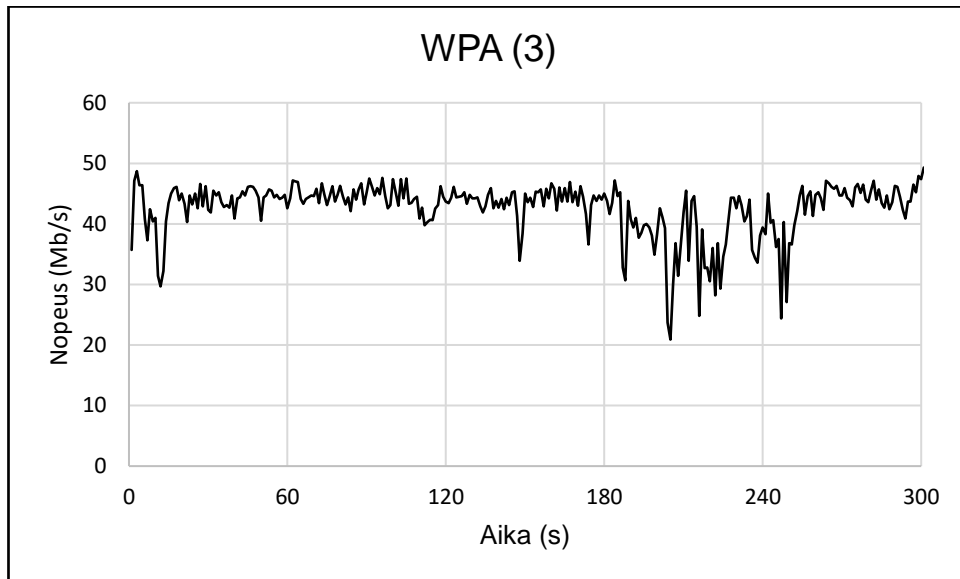


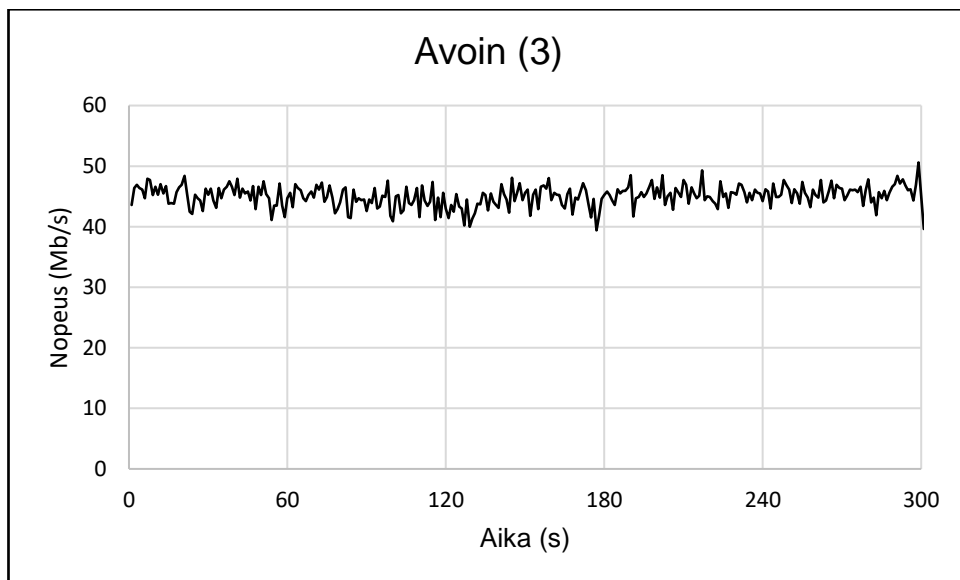
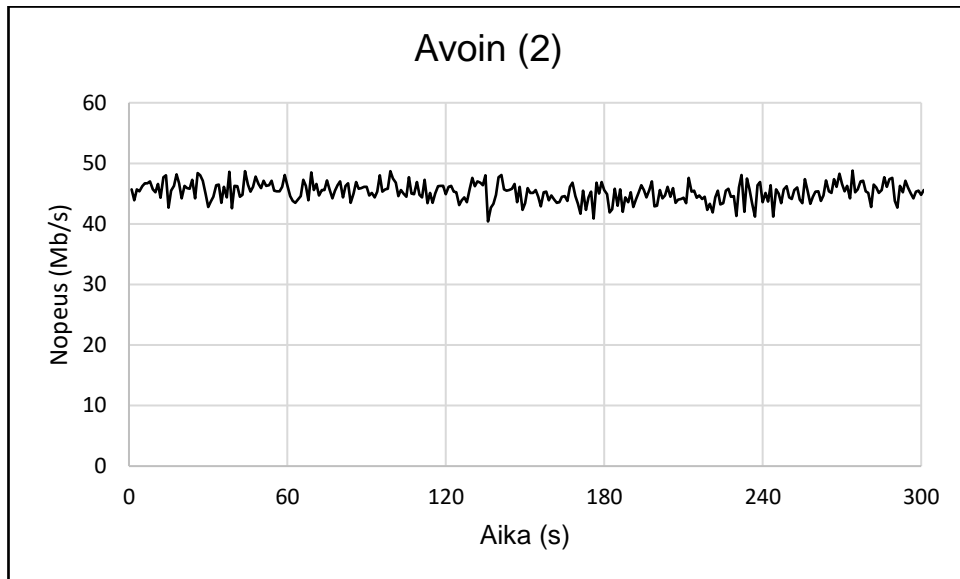
D-Linkin langattoman reitittimen dual-band-suorituskyky

Salauksen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen

Pvm.	18.4.2017
Standardi	n
Taajuusalue	2,4 GHz
Kaistanleveys	20 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
WLAN-liityntä	AC-verkkokortti







Pvm.	27.2.2017
Standardi	ac
Taajuusalue	5 GHz
Kaistanleveys	80 MHz
TCP-ikkunan koko	1024 KB
WLAN-liityntä	AC-verkkokortti

